



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## REKUPERAČNÍ SYSTÉMY V AUTOMOBILOVÉ TECHNICE

RECUPERATION SYSTEMS IN AUTOMOTIVE TECHNOLOGY

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Běhoun

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lubor Zháňal, Ph.D.

BRNO 2022



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Lukáš Běhoun**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Lubor Zháňal, Ph.D.**  
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Rekuperační systémy v automobilové technice

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rekuperace energie je důležitý prvek při snaze o dosažení co největší energetické efektivity provozu vozidel. Cílem práce je vytvořit přehled minulých, současných i uvažovaných budoucích rekuperačních technologií a porovnat jejich technické i ekonomické parametry.

### Cíle bakalářské práce:

Historický vývoj.

Rozdělení podle oblastí (osobní doprava, nákladní doprava, motorsport).

Porovnání aktuálně používaných systémů.

Výhled do budoucna.

### Seznam doporučené literatury:

KREITH, F. The CRC Handbook of Mechanical Engineering. 1. vyd. 1998. ISBN 978-0-8493-0866-6.

MILLIKEN, W., MILLIKEN, D. Race Car Vehicle Dynamics. 1st edition. Warrendale: SAE, 1995. 857 s. ISBN 1-56091-526-9.

GILLESPIE, T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. 519 s. ISBN 1-56091-199-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá metodami rekuperace energie v automobilové technice. V první části je přiblížen historický vývoj rekuperačních systémů od konce 19. století až do současnosti. Druhá část je věnována rozdělení rekuperačních systémů podle způsobu akumulace a přenosu energie. Pro každý systém jsou uvedeny tři příklady použití. Ve třetí části jsou porovnány jednotlivé akumulátory a následně celé rekuperační systémy používané v autobusové dopravě. Ve čtvrté části byl proveden výpočet spotřeby paliva autobusu bez rekuperačního systému a stejného autobusu s rekuperačním systémem Bosch Rexroth. Poslední část se zabývá možným budoucím vývojem rekuperačních systémů.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Rekuperace energie, KERS, akumulátory, kinetická energie, elektromobilita, regenerativní brzdění

## ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is to examine the methods of energy recuperation in the automotive technology. The first section explores the historical development of the recuperation systems spanning from the end of the 19<sup>th</sup> century to the present day. The second section is following with the division of the recuperation systems in accordance with the method of their energy storage and their transmission. This is consecutively supported by three examples of use for each of the systems. The third section offers a comparison of the individual cumulative units. Furthermore, it offers a comparison of all the types of systems used in bus transportation. The fourth section analyses the fuel consumption by a bus without a recuperation system and by an identical bus with the Bosch Rexroth recuperation system. This is supported by calculations. Subsequently, the above systems are scrutinized from an economical point of view. The last part deals with the possible development of recuperation systems in the future.

## KEYWORDS

Energy recovery, KERS, accumulators, kinetic energy, electromobility, regenerative braking

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

BĚHOUN, Lukáš. *Rekuperační systémy v automobilové technice*. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 64 s. Vedoucí práce Lubor Zháňal.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Lubora Zháňala, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 16. května 2022

.....  
Lukáš Běhoun

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Luboru Zháňalovi, Ph.D. za cenné rady, užitečné připomínky a odborné vedení při psaní této závěrečné práce.

Chtěl bych také poděkovat mým rodičům za podporu při studiu i mimo něj.



---

**OBSAH**

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Úvod .....   | 11 |
| 2     | Historie .....   | 12 |
| 3     | Rekuperace energie.....                                    | 15 |
| 3.1   | Definice pojmu .....                                       | 15 |
| 3.2   | Výhody.....  | 16 |
| 3.3   | Nevýhody.....  | 16 |
| 4     | Mechanická metoda rekuperace energie.....                  | 17 |
| 4.1   | Princip funkce .....                                       | 17 |
| 4.2   | Setrvačnick .....  | 17 |
| 4.3   | CVT převodovka.....  | 20 |
| 4.4   | Reálné provedení mechanické metody .....                   | 20 |
| 4.4.1 | Volvo Flybrid systém .....                                 | 20 |
| 4.4.2 | Flybus systém .....  | 21 |
| 4.4.3 | Motorsport .....   | 22 |
| 5     | Elektromechanická metoda rekuperace kinetické energie..... | 24 |
| 5.1   | Princip funkce .....                                       | 24 |
| 5.2   | Elektromotory používané v automobilové technice .....      | 24 |
| 5.2.1 | Asynchronní motor .....                                    | 24 |
| 5.2.2 | Synchronní motor s permanentními magnety.....              | 25 |
| 5.3   | Reálné provedení elektromechanické metody .....            | 26 |
| 5.3.1 | Audi R18 e-tron Quattro.....                               | 26 |
| 5.3.2 | Autobusy a trolejbusy .....                                | 27 |
| 5.3.3 | Použití v těžké technice .....                             | 28 |
| 6     | Elektrická metoda rekuperace kinetické energie .....       | 29 |
| 6.1   | Princip funkce .....                                       | 29 |
| 6.2   | Elektrochemické akumulátory .....                          | 29 |
| 6.2.1 | Olovené akumulátory (Pb-PbO <sub>2</sub> ).....            | 30 |
| 6.2.2 | Nikl-kadmiové akumulátory (NiCd) .....                     | 31 |
| 6.2.3 | Nikl-metalhydridové akumulátory (NiMH) .....               | 32 |
| 6.2.4 | Lithium-ionové akumulátory (Li-ion) .....                  | 32 |
| 6.3   | Vysokoenergetické kondenzátory (Superkapacitor).....       | 33 |

---

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 6.3.1 | Elektrochemický dvouvrstvý kondenzátor (EDLC) .....          | 33 |
| 6.3.2 | Pseudokondenzátor .....                                      | 35 |
| 6.4   | Reálné provedení elektrické metody .....                     | 35 |
| 6.4.1 | Škoda ENYAQ iV .....   | 35 |
| 6.4.2 | Peugeot e-Expert .....                                       | 36 |
| 6.4.3 | Lamborghini Sián FKP .....                                   | 37 |
| 7     | Hydrostatická metoda rekuperace kinetické energie .....      | 39 |
| 7.1   | Princip funkce.....  | 39 |
| 7.2   | Části systému.....   | 39 |
| 7.2.1 | Hydrostatická jednotka HM/HG .....                           | 39 |
| 7.2.2 | Tlaková nádoba .....   | 40 |
| 7.2.3 | Ostatní komponenty .....                                     | 41 |
| 7.3   | Reálné provedení hydrostatické metody .....                  | 41 |
| 7.3.1 | Volvo B10R .....   | 41 |
| 7.3.2 | Bosch Rexroth ve vozidlech pro svoz komunálního odpadu ..... | 42 |
| 7.3.3 | Hydrostatická rekuperace v motocyklu.....                    | 42 |
| 8     | Porovnání metod .....  | 44 |
| 8.1   | Porovnání akumulátorů .....                                  | 44 |
| 8.2   | Porovnání jednotlivých rekuperačních systémů.....            | 47 |
| 8.3   | Autobusy Dopravního podniku města Brno.....                  | 48 |
| 9     | Výhled do budoucna .....                                     | 50 |
| 9.1   | Rekuperace energie z tlumičů vozidla.....                    | 50 |
| 9.1.1 | Prototyp Audi eROT .....                                     | 50 |
| 9.2   | Rekuperace kinetické energie spalin .....                    | 51 |
| 9.3   | Rekuperace tepelné energie spalin .....                      | 52 |
| 9.4   | Vývoj nových akumulátorů.....                                | 53 |
| 10    | Závěr .....  | 54 |
| 11    | Seznam použité literatury.....                               | 56 |
| 12    | Seznam obrázků .....   | 62 |
| 13    | Seznam grafů.....  | 63 |
| 14    | Seznam tabulek .....   | 63 |
| 15    | Seznam použitých zkratk .....                                | 64 |

# 1 ÚVOD

Vynález spalovacího motoru zásadně ovlivnil vývoj celé společnosti. V 21. století si už jen stěží dokážeme představit život bez osobní přepravy. Automobily nás obklopují na každém kroku a zásadním způsobem formují krajinu okolo nás. Počet vozidel v provozu se však neustále zvyšuje a v poslední době se ukazuje, že je to dlouhodobě neudržitelný problém.

Vysoká spotřeba fosilních paliv a produkce velkého množství výfukových plynů byly příčinou vzniku emisních norem po celém světě. V roce 1968 vešla v platnost vůbec první emisní norma v Kalifornii. O 3 roky později začala platit emisní norma EHK 15 i v Evropě. V současné době platí zatím nejprísnější normy, které omezují produkci toxických výfukových plynů.

Právě stále přísnější normy donutily výrobce automobilů k vývoji nových technologií, které by dokázaly snížit produkci emisí. Jednou takovou technologií se staly právě rekuperační systémy. Do této doby byli předchůdci moderních rekuperačních systémů využívány až na několik výjimek převážně v železniční a tramvajové dopravě.

Převážná většina rekuperačních systémů zpětně získává kinetickou energii vozu, která se při zpomalování přeměňuje na ztrátovou tepelnou energii mezi brzdovým kotoučem a brzdovou destičkou. Rekuperační systémy umožňují tuto energii uložit ještě před zmíněnou přeměnou a zpětně ji využít například při rozjezdu automobilu nebo k napájení palubní sítě. To výrazně prospívá celkovému dojezdu vozidel. Pro běžného majitele vozidla znamenají rekuperační systémy vysokou úsporu paliva a snížení opotřebení brzdových destiček a kotoučů.

Dnes jsou různé rekuperační systémy již běžně používanou metodou snižování celkové energetické náročnosti provozu všech druhů vozidel.

## 2 HISTORIE

První rekuperační systémy se začaly objevovat již na konci 19. století. Mezi průkopníky v oblasti této technologie patří Frank Julian Sprague. V roce 1886 světu představil svůj systém pro použití ve výtazích a trolejbusích, kde elektromotory při brzdění dobíjely energii zpět do rozvodného systému. Po dvou letech postavil první rozvodnou síť pro pohon trolejbusů, kde se rekuperační systém osvědčil pro použití ve větším měřítku. Po prvotním úspěchu se jeho návrh začal používat i například v lanovkách a vlecích.

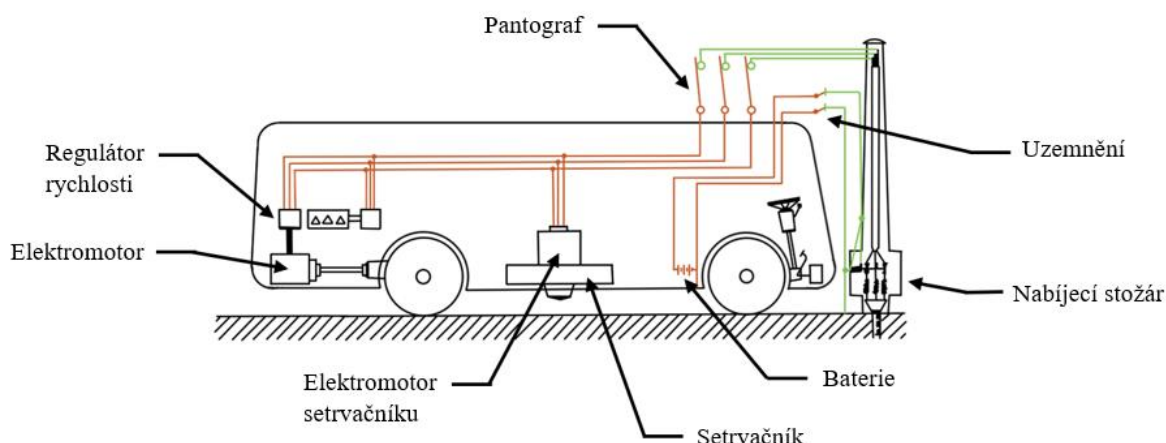
V elektromobilovém průmyslu se mezi průkopníky řadí Louis Antoine Krieger, který v roce 1894 začal s výrobou elektrických vozů. V roce 1903 jeho společnost vyvinula první osobní vozidla s rekuperačním systémem. Automobil byl vybaven elektromotory na předních kolech, které při brzdění dobíjely olověné baterie. Společnost kvůli finančním problémům a malému zájmu o elektromobily ukončila produkci v roce 1909.

Ve 20. letech minulého století jeden z propagátorů rekuperačních systémů a později ředitel Oerlikonských strojů Hans Behn-Eschenburg použil svůj návrh zapojení elektrodynamické brzdy na lokomotivách Ce6/8<sup>II</sup> (Obr. 2.1) a Ce6/8<sup>III</sup>. Elektrodynamická brzda je zařízení, které je schopné měnit kinetickou energii na elektrickou energii. Využívá se převážně pro drážní vozidla. V tomto případě sloužil elektromotor a hydraulická brzda jako brzdňá soustava stroje. O 20 let později byla na lokomotivách Re4/4<sup>II</sup> a Re4/4<sup>III</sup> aplikována kombinace dvou Behn-Eschenburgových zapojení, a tím byla zvýšena účinnost rekuperace energie.



Obr. 2.1 Lokomotiva Ce6/8<sup>II</sup> [1]

V roce 1950 švýcarská společnost Oerlikon představila veřejnosti gyrobus (Obr. 2.2). Šlo o vůbec první pokus o rozšíření veřejné hromadné dopravy, která by měla místo motorového pohonu elektromotor a místo baterie setrvačnický, který se později začal používat jako akumulátor pro rekuperační systémy. Setrvačnický byl umístěn uprostřed gyrobusu a každé 4 kilometry se znovu dobíjel na stanici. Gyrobus měl hned několik nedostatků, mezi které patřil hlavně: velmi nízký dojezd, dlouhá doba nabíjení, nízký výkon a nejvíce to byl v té době nezvladatelný gyroskopický moment působící na vozidlo. [2] To vše vyústilo v rychlé ukončení produkce. Nicméně Oerlikon položil solidní základy pro další využití setrvačnicků.



Obr. 2.2 Schéma gyrobusu

Americká automobilová společnost AMC představila v roce 1967 koncept vozu AMC Amitron (Obr. 2.3). Vůz byl vybaven elektromotorem na přední nápravě, který při zpomalování dobíjel nikel-cadmiové baterie. Vozu se díky tomu zvýšil dojezd o 35 km. [3] Bohužel kvůli designu a nepraktičnosti vozidla byl zájem o koupi tak malý, že se koncept nikdy nedostal k sériové produkci.

V roce 1992 přišla Toyota s myšlenkou hybridního pohonu jejich automobilu. Vývoj v té době vedl Takehisa Yaegashi, kterému se dnes přezdívá „Otec hybridů“. Po třech letech představil první koncept vozu na autosalonu v Tokiu, kde vůz dostal jméno Prius (Obr. 2.4). V roce 1997 byl Prius uveden na trh.

Toyota Prius byl první sériově vyráběný vůz s rekuperačním systémem, který oslavil úspěch na trhu. Vůz při brzdění využívá elektromotor na nápravě spolu s klasickou brzdou. Elektromotor v generátorickém módu dobíjí nikel-metalhydridový (Ni-MH) akumulátor, při rozjíždění naopak využívá elektromotor energii uloženou při brzdění pro plynulý rozjezd namísto spalovacího čtyřválcového motoru.



Obr. 2.3 AMC Amitron [4]



Obr. 2.4 Koncept vozu Toyota Prius [5]

V roce 2008 společnost Tesla uvedla na trh plně elektrický automobil Tesla Roadster. Vůz disponuje jedním elektromotorem o výkonu 185 kW. Při brzdění vozidla je motor přepnut do reverzního chodu a generuje elektrickou energii, která se ukládá do 6 831 lithium-iontových (Li-ion) článků. Oproti ostatním soudobým rekuperačním systémům byl právě systém Tesly nejúčinnější. Při ideálních podmínkách bylo zpětně využito 64 % energie ztracené při brzdění [6].



Obr. 2.5 Tesla Roadster 2008 [7]

Ve stejném roce vydala Mezinárodní automobilová federace (FIA) prohlášení, ve kterém podpořila používání rekuperačních systémů do výkonu 60 kW v závodech Formule 1. [8] Rekuperační systém umožnil vozidlu krátkodobé zvýšení výkonu, který bylo možné využít například při předjíždění.

Účelem reformy pravidel závodů bylo zvýšit jejich atraktivitu a rozšířit myšlenku rekuperace energie do povědomí fanoušků a diváků. Týmy čtvrt roku poté začaly testovat dva druhy systémů. Prvním bylo použití setrvačnicku a druhým bylo použití baterie k uskladnění energie.

Společnost Flybrid Systems představila čistě mechanický způsob uchování energie pomocí setrvačnicku připojeného k hnacímu ústrojí přes spojku a převodovku.

Společnost Magneti Marelli vyvinula pro Formuli 1 plně elektrický rekuperační systém bez mechanického setrvačnicku. Rekuperovaná energie se ukládá do elektrochemického akumulátoru.

Za zmínku stojí také systém společnosti William's, který kombinuje dva předchozí způsoby. K ukládání energie se používá setrvačnick se zabudovaným elektromotorem.



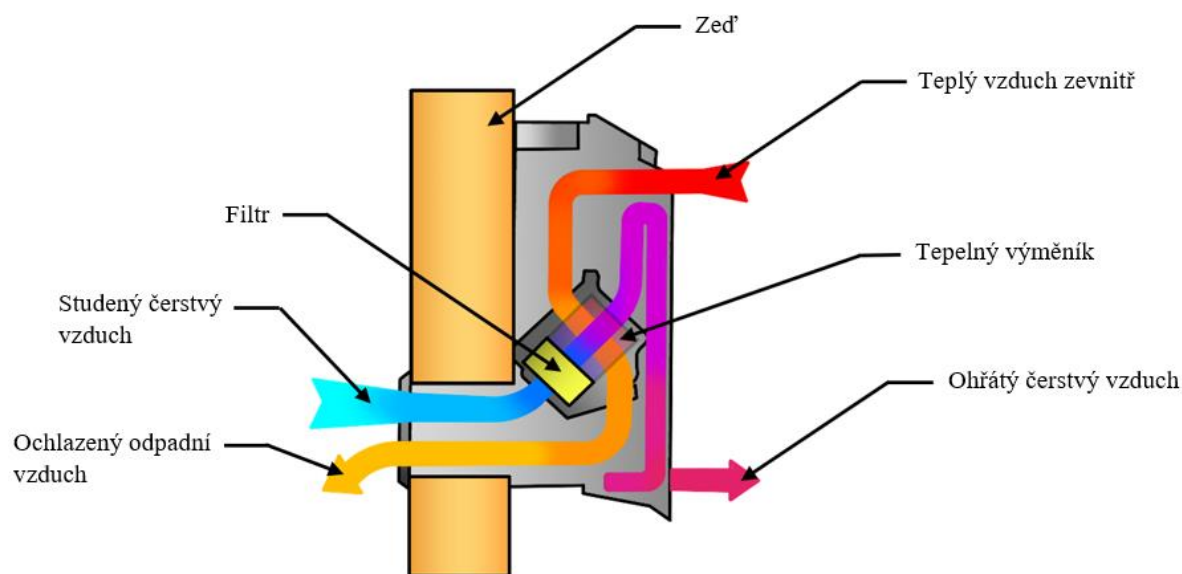
### 3 REKUPERACE ENERGIE

#### 3.1 DEFINICE POJMU

Termín označuje proces, při kterém je zpětně získávána energie, která by jinak zůstala nevyužita, nebo je přeměňována energie pro nás nevyužitelná na energii využitelnou. Díky této technologii lze snížit náklady na energii a provoz strojů a výrazně prospět životnímu prostředí.

Při zpětném získávání tepelné energie se jedná například o rekuperaci tepla v kovozpracujících podnicích. Teplo vznikající při obrábění kovů lze z chladicí kapaliny díky rekuperačním systémům využít pro vytápění kanceláře, případně celé haly. Touto technologií se zabývá mimo jiné společnost KORINEX.

Další ze společností zabývajících se rekuperací je Altea. Ta se specializuje na rekuperaci odpadního tepla při větrání (Obr. 3.1). Jednotka přivádí studený čerstvý vzduch zvenku a zároveň teplý vzduch zevnitř do výměníku, ve kterém se vyrovnává teplota vzduchu, aniž by se proudy vzduchu promíchaly. Po vyrovnání teploty je venkovní vzduch přes filtry zbaven nečistot a vpuštěn do místnosti, případně celého domu. Díky tomuto způsobu větrání lze zpětně získat až 90 % tepla [9].



Obr. 3.1 Rekuperace odpadního tepla při větrání

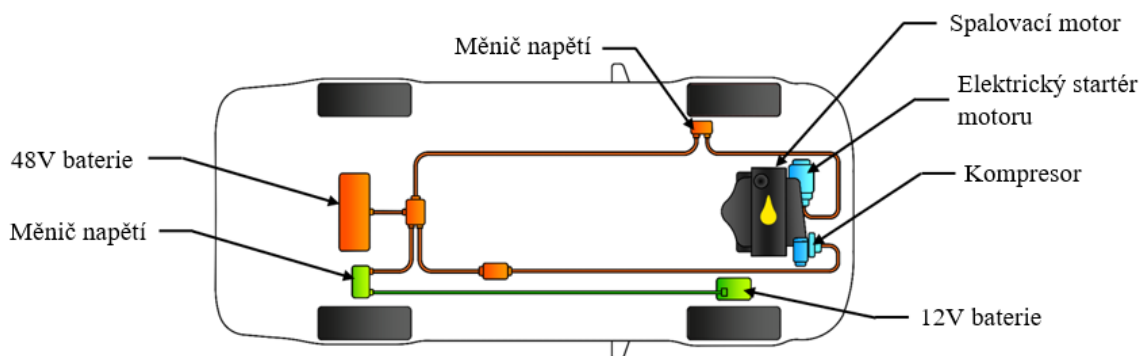
V automobilovém průmyslu se jedná hlavně o přeměnu kinetické energie na elektrickou energii. Při brzdění vzniká kvůli tření mezi brzdovými destičkami a brzdovým kotoučem velké množství odpadní tepelné energie. Rekuperační systém umožňuje využít kinetickou energii ještě předtím, než se přemění na tepelnou, a uložit ji do akumulátoru. Tuto energii lze později využít například při rozjezdu vozidla.

### 3.2 VÝHODY

Mezi hlavní výhody patří snížení spotřeby vozidla. Společnost Ford v roce 2013 uvedla, že za 15 let používání rekuperace kinetické energie ušetřila 378,5 milionů litrů paliva ve všech svých vozidlech vybavených rekuperačním systémem [10]. Co se týče elektrických vozidel, majitelé uvádí až 32% úsporu energie v běžném provozu. To v praxi znamená, že díky rekuperaci se dojezd zvýší ze 100 km na 132 km. [11]

Rekuperační systém umožňuje tzv. „One-pedal driving“. To znamená, že řidič je schopen zrychlovat a zpomalovat pouze díky plynovému pedálu, což výrazně zvyšuje komfort při řízení. Velká většina vozidel vybavených rekuperačním brzděním má 3 polohy nastavení intenzity rekuperace energie. Podle nastavení intenzity brzdění automobil zpomaluje danou intenzitou až na rychlost 3 km/h, poté už je třeba použít konvenční brzdy. Tato funkce zároveň výrazně snižuje opotřebení brzdových destiček.

Rekuperační systém BRS (z anglického Boost recuperation system) od společnosti Bosch (Obr. 3.2) kromě rekuperace kinetické energie zároveň výrazně zlepšuje systém Start-stop. Při zpomalování vozidla se nabíjí 48V baterie. Ta při vypnutém motoru napájí palubní počítač a při rozjezdu dodává elektrickou energii startéru namísto 12V autobaterie. Zároveň s tím napájí elektromotor, který dodává až 10 kW a odlehčuje spalovacímu motoru při rozjezdu. Tímto způsobem ušetří BRS až 15 % paliva [12].



Obr. 3.2 Schéma BRS společnosti Bosch

### 3.3 NEVÝHODY

Jednou z hlavních nevýhod je samotná konstrukce. Každý rekuperační systém se skládá z několika částí. Většina běžně používaných se skládá z elektromotoru a baterie, případně setrvačnicku. Každá z těchto součástí přidává vozu hmotnost. To je problém převážně v motorsportu (např. závody Formule 1, 24h Le Mans), kde jsou rekuperační systémy povoleny. Pro běžného spotřebitele je problémem poruchovost konstrukce. Každá část, přestože snižuje opotřebení částí vozidla, se může poškodit a údržba některých částí konstrukce je poměrně nákladná.

Další nevýhoda rekuperace spočívá ve složitosti systému. S tím je spjata i vysoká cena vývoje a samotné konstrukce. Mercedes v roce 2011 uvedl, že vývoj jejich KERS systému použitého v jejich voze Formule 1 stál 126 375 000 Kč [13].

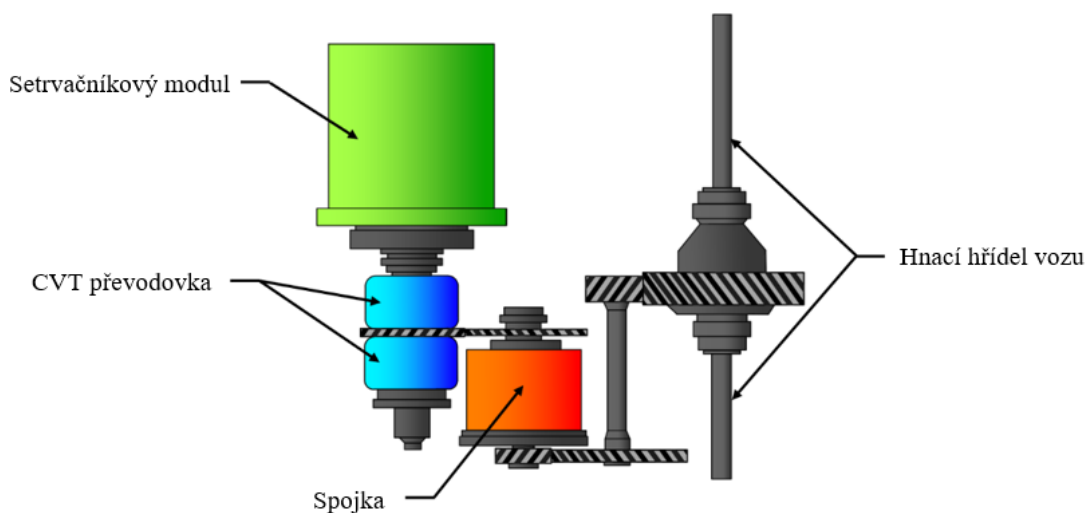


## 4 MECHANICKÁ METODA REKUPERACE ENERGIE

### 4.1 PRINCIP FUNKCE

Zásobování energie je realizováno pomocí rotující hmoty s vysokým momentem setrvačnosti. Ta se označuje jako setrvačnick (Obr. 4.2).

Při zpomalování vozidla spojka spojí hnací hřídel s CVT (z anglického Continuously Variable Transmission) převodovkou a přeneše na ni točivý moment. Řídící jednotka upraví převodový poměr CVT převodovky pro co nejlepší přenos momentu. Točivý moment roztočí setrvačnick připojený k převodovce, a tím uloží energii k pozdějšímu využití. Naopak při akceleraci vozidla setrvačnick zpomaluje, a generuje tím točivý moment. Ten se přes celé ústrojí převede zpět na hnací hřídel vozidla.

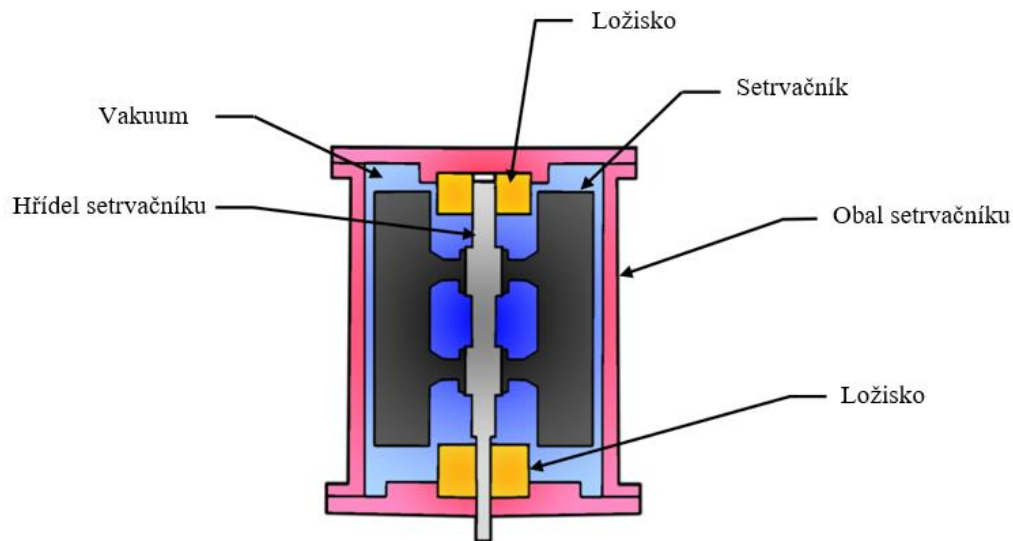


Obr. 4.1 Schéma mechanické metody rekuperace energie

### 4.2 SETRVAČNÍK

Setrvačnick (Obr. 4.2) je rotační zařízení používané k akumulaci energie bez nutnosti použití chemických procesů. V dnešní době má obvykle tvar dutého válce, na rozdíl od minulosti, kde byl používán tvar kola s paprsky. Důvodem změny tvaru je velký pokrok v této technologii a potřeba zmenšit průměr samotných setrvačnicků. Postupem času byly velkou mírou sníženy ztráty energie vlivem tření v ložisku, postupným nahrazením valivých ložisek ložisky magnetickými (hlavně v bateriích na bázi setrvačnicku). Odpor vzduchu při rotaci byl taktéž snížen na minimální hodnotu díky využívání vysokého vakua v prostředí setrvačnicku (to platí převážně v setrvačnickových akumulátorech). Další příčinou změny tvaru byl vývoj nových velice pevných materiálů, v tomto případě sem patří například polymery vyztužené uhlíkovými vlákny.

Různé společnosti, mezi kterými vede například NASA, se i v dnešní době snaží najít ideální konstrukci, která by umožnila maximální využití setrvačnicku jako uložistiště energie.



Obr. 4.2 Řez setrvačnickovým modulem

Množství energie, které lze uložit do setrvačnicku je popsáno vzorcem (1).

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (1)$$

Kde:  $E_k$  (J) kinetická energie  
 $I$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ) moment setrvačnosti  
 $\omega$  ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ) úhlová rychlost

Pro nejčastější zjednodušený tvar setrvačnicku, tedy tvar dutého válce, lze moment setrvačnosti spočítat podle vzorce (2).

$$I = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (R^2 - r^2) \quad (2)$$

Kde:  $I$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ) moment setrvačnosti  
 $m$  (kg) hmotnost tělesa  
 $R$  (m) velký poloměr válce  
 $r$  (m) malý poloměr válce

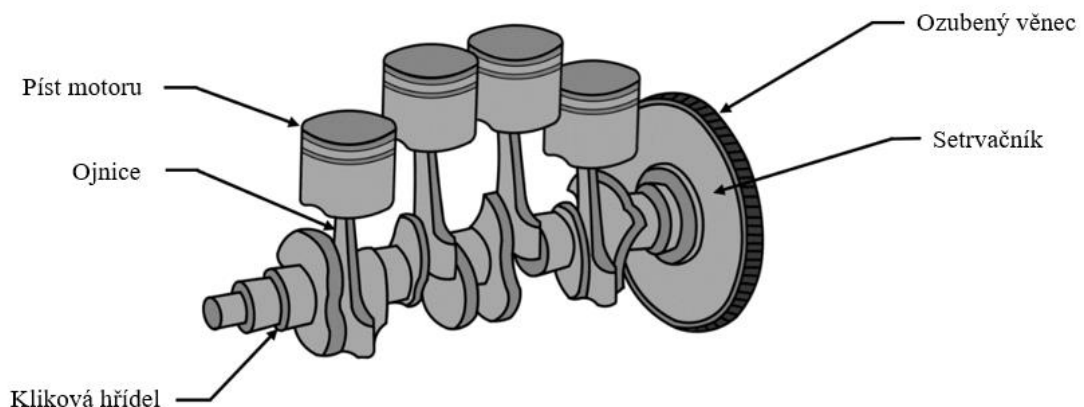
Setrvačnický se poprvé ve velkém měřítku objevily u parních strojů, kde rovnoměrně rozváděly točivý moment z jednoválcového motoru na hnací hřídele. Dále se v minulosti používaly například u tkalcích strojů.

V automobilové technice našly setrvačníky uplatnění při stabilizaci chodu motoru (Obr. 4.3). Výkon generovaný motorem není konstantní. Při kompresi směsi je třeba dodat práci, zatímco při expanzi směsi je práce vykonána. To má za následek trhavý pohyb klikové hřídele, který vede k vysokému snížení trvanlivosti motoru a snížení komfortu při jízdě. Jedním z možných řešení je přidání setrvačníku na konec klikové hřídele. Setrvačník při expanzi (vykonání práce) akumuluje část energie. Tuto energii při následné kompresi dodává zpět hřídeli. Tímto způsobem je možné eliminovat rázy a tím zvýšit samotnou trvanlivost motoru. Dříve se v automobilech používal jednohmotový setrvačník, dnes se již ve velké většině používá dvouhmotový.

Dvouhmotový setrvačník se liší svým konstrukčním provedením - je rozdělen na dvě části oddělené pružným lemem. Pružný lem je tvořen buďto soustavou malých pružin, nebo gumovými částmi. Díky tomuto provedení je setrvačník schopen snížit vibrace klikové hřídele a s tím spojený hluk až o 80 %.

Velká většina setrvačníků umístěných na klikové hřídeli má po svém obvodu nalisovaný ozubený věnec. Ten slouží pro připojení startéru vozidla. Startér vozidla při dodávání energie roztáhne ozubené kolo na svém konci, které zapadá do ozubeného věnce setrvačníku. Roztočený setrvačník poté umožňuje start motoru.

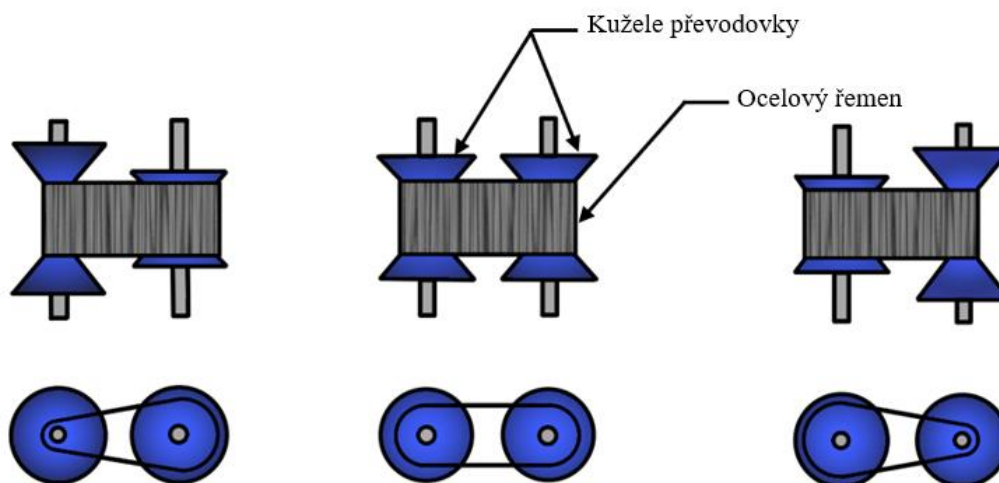
Setrvačníky lze použít i k jiným účelům, než je ukládání energie a stabilizace chodu motoru. Příkladem může být stabilizace objektů ve vesmíru - to se označuje jako tříosá stabilizace. Několik setrvačníků se točí konstantní rychlostí a tím způsobují, že na objekt začne působit gyroskopický moment. Řídící jednotka určuje rychlost rotace daných setrvačníků a stabilizuje objekt pomocí řízení směru působení a velikosti gyroskopického momentu.



Obr. 4.3 Kliková hřídel spalovacího motoru se setrvačníkem

### 4.3 CVT PŘEVODOVKA

Jedná se o převodovku s plynule měnitelným převodovým poměrem, jejíž základ tvoří variátor a řídicí jednotka. Variátor (Obr. 4.4) tvoří dvě soustavy dvou ocelových kuželových kotoučů, z nichž je jeden nepohyblivý a druhý lze axiálně posouvat. Kotouče jsou navzájem spojeny ohebným ocelovým řemenem, který je složen z mnoha za sebe poskládaných ocelových článků. Řídicí jednotka ovládá vzdálenost kuželových kotoučů, a tím přizpůsobuje převodový poměr daným podmínkám.



Obr. 4.4 Princip funkce variátoru

V případě rekuperace kinetické energie CVT převodovka převádí točivý moment z hnací hřídele vozu na hřídel setrvačnicku. Při jízdě konstantní rychlostí je převodový poměr nastavený tak, aby bylo přenášeno co nejméně točivého momentu. Při zpomalování vozidla řídicí jednotka zaznamená sešlápnutý brzdový pedál a podle toho nastaví kuzele variátoru tak, aby bylo převedeno co nejvíce točivého momentu z hnací hřídele na setrvačnicku. To znamená, že co nejvíce oddálí kuzele na straně hnací hřídele vozu, a maximálně přiblíží kuzele na straně setrvačnicku. Při akceleraci vozu zase řídicí jednotka nastaví převodový poměr tak, aby se převedlo co nejvíce točivého momentu ze setrvačnicku na hnací hřídel.

## 4.4 REÁLNÉ PROVEDENÍ MECHANICKÉ METODY

### 4.4.1 VOLVO FLYBRID SYSTÉM

V roce 2011 začala automobilová společnost Volvo testovat použití KERS (z anglického Kinetic Energy Recovery System) systému na bázi setrvačnicku ve svých vozech. Testování probíhalo 4 roky na vozu Volvo S60 T5 s náhonem na přední nápravu. Na zadní nápravu byl navíc namontován setrvačnicku s CVT převodovkou a spojkou (Obr. 4.6). Setrvačnicku měl řídicí jednotkou omezené maximální otáčky na 60 000 za minutu a byl schopen udržet energii až 30 minut. Při normálním jízdním režimu setrvačnicku pouze odlehčoval benzínovému motoru při rozjezdech, při nastaveném sportovním režimu vozidla setrvačnicku navíc dodával výkon až 59 kW. Při testech se zjistilo, že vůz bez KERS systému zrychlí z 0 na 100 km/h za 7 sekund,

zatímco vůz vybavený tímto systémem byl o 1,5 sekundy rychlejší. Spotřeba paliva testovaného vozidla byla snížena o téměř 20 % [14].

Prvním sériově vyráběným vozidlem s tímto systémem se v roce 2020 stal vůz s hybridním pohonem Volvo XC90 (Obr. 4.5). Díky KERS systému je možné ušetřit až 15 % elektrické energie při jízdě ve městě, kde vozidlo často zastavuje a zase se rozjíždí. Mimo město není systém tak účinný. Při jízdě konstantní rychlostí na dálnici je možné ušetřit pouze 10 % elektrické energie [15].

Setrvačnický o průměru 20 cm použitý ve Volvo XC90 je vyroben z uhlíkových vláken a váží 6 kg. Pro co největší snížení ztrát vlivem odporu vzduchu se otáčí ve vakuové komoře. Osazená hřídel, na které se setrvačnický otáčí, je uložena na valivých ložiskách společnosti SKF, která se podílela na návrhu celého systému. Celkově celý systém váží 60 kg, což je výrazně méně než jakýkoli jiný sériově vyráběný rekuperační systém na bázi setrvačnický. [16]



Obr. 4.5 Volvo XC90 [17]



Obr. 4.6 KERS společnosti Volvo [16]

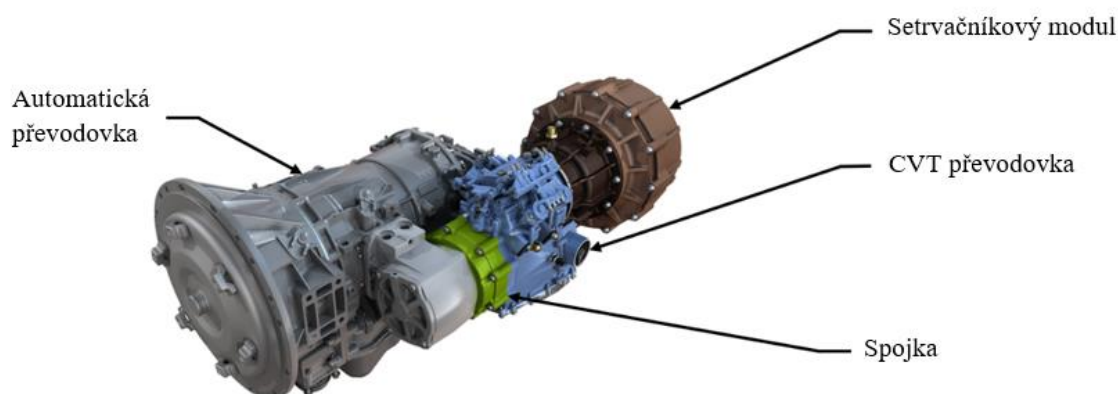
#### 4.4.2 FLYBUS SYSTÉM

Tento KERS systém vznikl za kolaborace čtyř společností. Společnost Ricardo dodala modul setrvačnický, vývojáři společnosti Allison a Torotrak společně zkonstruovali CVT převodovku a společnost Optare dodala autobusy potřebné pro otestování systému.

Flybus systém (Obr. 4.7) je velice podobný Volvo Flybrid systému co se týče specifikací. Otáčky setrvačnický z karbonových vláken jsou kvůli trvanlivosti ložisek omezeny na 60 000 otáček za minutu. Osazená hřídel je uložena na valivých ložiskách. CVT převodovka je schopna přenášet až 60 kW výkonu a celá váží pouhých 10 kg. [18]

Hlavní rozdíl v konstrukci systému Flybus oproti Flybrid je způsob napojení na hnací ústrojí vozu. Systém Flybus je namontován přímo na automatickou převodovku vozu. Díky tomu je poměrně snadné přidat tento KERS na starší vůz vybavený daným druhem automatické převodovky.

V roce 2015 byl po úspěšném testování systém namontován na vůz Euro VI StreetLite bus společnosti Wrightbus. Společnost hlásí návratnost nákladů na pořízení systému nejdéle po 5 letech a úspory paliva až 15 % pro autobusy v městské oblasti [19].



Obr. 4.7 Model Flybus systému [18]

#### 4.4.3 MOTORSPORT

KERS systémy (Obr. 4.8) byly v roce 2009 poprvé použity v sezóně závodů Formule 1. Na tento rok vydalo FIA prohlášení, ve kterém povolili použití mechanického způsobu rekuperace kinetické energie na zadních nápravách. V prvních letech bylo povoleno rekuperovat 400 kJ energie. To odpovídalo výkonu 60 kW po dobu 6,6 sekundy na kolo.

Během prvního roku KERS systému v motorsportu byly použity jen čtyřmi týmy. Ferrari, Renault, BMW a McLaren všichni použili systém společnosti Flybrid Systems. V průběhu sezóny týmy Renault a BMW systém po několika selháních používat přestaly.

Systém Flybrid byl složen z CVT převodovky, spojky a setrvačnickového modulu. Celý systém vážil pouze 25 kg. To byl obrovský pokrok oproti dřívějším KERS systémům. Setrvačnick byl vyroben z uhlíkových vláken s ocelovým jádrem a měl počítačem omezené otáčky na 64 500 otáček za minutu. Kvůli vysokému riziku nehody při závodech byl setrvačnick v obzvlášť silném ochranném pouzdru. [20]

Vysoké otáčky setrvačnicku generovaly poměrně velký gyroskopický moment, který působil na vozidlo. Řešením, kterému se věnovalo několik společností, bylo použití dvou setrvačnicků místo jednoho. Setrvačnický se roztáčely proti sobě, a tím se gyroskopické momenty beze zbytku vyrušily. Jednou z nevýhod této konstrukce byla zvýšená hmotnost rekuperačního systému. Konečným řešením, které použily téměř všechny týmy, se stalo umístění setrvačnicku za jezdce, kde generovaný gyroskopický moment není příliš významný.

Prvním týmem, který vyhrál s vozem vybaveným KERS systémem, se 26. července 2009 stal McLaren Mercedes (Obr. 4.9), když Lewis Hamilton vyhrál Velkou cenu Maďarska.

Přestože v roce 2010 bylo povoleno vybavit vůz KERS systémem, týmy se domluvily, že jej nikdo nepoužije. Nová pravidla na rok 2011, která zvýšila minimální hmotnost vozu s jezdce, umožnila stájm znovu použít KERS zařízení. Pouze 3 týmy z 12 se rozhodly systém nepoužívat.



Od roku 2014 se ve většině závodních vozů začal používat elektrický, nebo elektromechanický způsob rekuperace kinetické energie. Způsobila to převážně změna používaných motorů z V8 2,4l na V6 1,6l. FIA zároveň na rok 2014 zvýšila povolený výkon KERS na dvojnásobek, tzn. na 120 kW.



Obr. 4.8 Systém Flybrid použitý ve Formuli 1 [21]

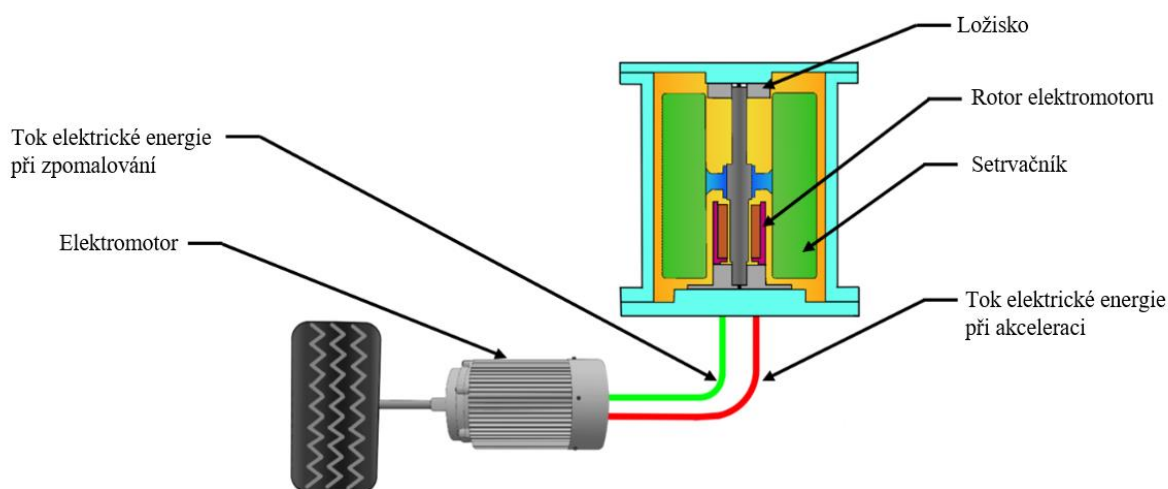


Obr. 4.9 McLaren Mercedes formule 2009 [22]

## 5 ELEKTROMECHANICKÁ METODA REKUPERACE KINETICKÉ ENERGIE

### 5.1 PRINCIP FUNKCE

Zásobování energie je realizováno stejně jako u mechanické metody pomocí setrvačníku. Rozdíl spočívá ve způsobu přenosu energie z hnací hřídele do setrvačníku (Obr. 5.1). Vozidlo při standardním zpomalování využívá elektromotor místo brzd. Elektromotor v reverzním chodu generuje elektrickou energii. Ta se následně využívá k roztočení jiného elektromotoru, ve kterém je uložena hřídel setrvačníku. Při rozjíždění naopak setrvačnick pohání elektromotor setrvačnicku, který generuje energii pro roztočení elektromotoru na hnací hřídeli. To může být využito pro rozjezd vozidla, nebo snížení potřebného výkonu motoru pro rozjezd.



Obr. 5.1 Schéma elektromechanické metody rekuperace

### 5.2 ELEKTROMOTORY POUŽÍVANÉ V AUTOMOBILOVÉ TECHNICE

#### 5.2.1 ASYNCHRONNÍ MOTOR

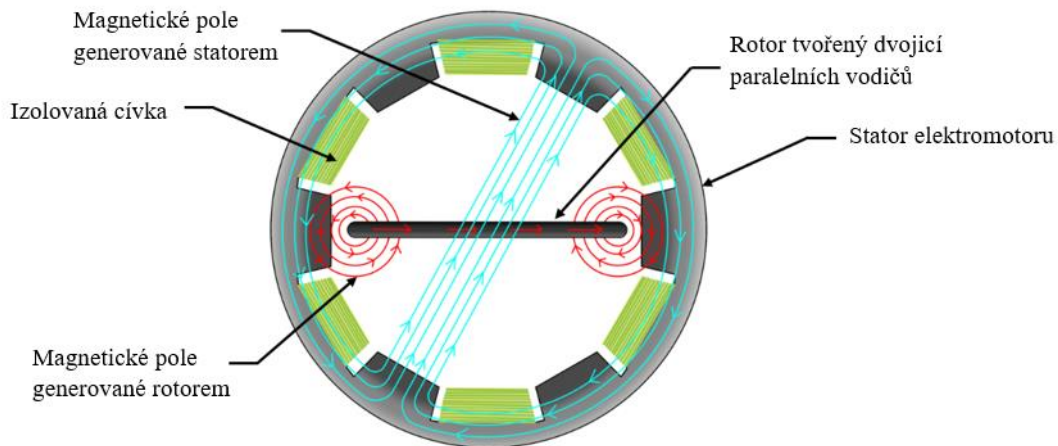
Asynchronní motor (Obr. 5.2) je točivý elektrický stroj pracující na střídavý proud. Oproti stejnosměrnému motoru zde odpadá nutnost použití vinutí kotvy a kolektoru.

Základem motoru je stator tvaru válce, složený ze stovek vrstev, tzv. statorových plechů, které leží těsně na sobě. Válec v sobě má pravidelné drážky, ve kterých jsou uloženy izolované cívky, nebo vlákna měděného drátu. Ty jsou po obvodu pravidelně rozmístěny ve dvojicích. Každá z těchto dvojic svírá s předchozí dvojicí úhel  $120^\circ$ . Tento úhel sleduje 3 fáze dodávaného střídavého proudu. Každé fázi je přiřazena jedna dvojice cívek. Proto má generované magnetické pole fázový posun taktéž  $120^\circ$ . Díky tomu se bude tok magnetického pole ve statoru otáčet.

Rotorem motoru je dvojice paralelních vodičů. Díky umístění rotoru v rotujícím magnetickém poli statoru je v rotoru indukováno napětí. Toto napětí způsobí, že vodiči začne protékat proud. Tento proud způsobuje v rotoru jeho vlastní magnetické pole, které reaguje s polem ve



statoru, a tím zapříčiní pohyb rotoru. Tento proud vzniká pouze za podmínky, že rychlost otáčení rotoru je nižší než rychlost otáčení magnetického pole statoru. Tuto podmínku zaručují ztráty způsobené třením mezi rotorem a hřídelí a samotná hmotnost rotoru. Rozdíl mezi rychlostí rotace magnetického pole statoru a rychlostí rotace rotoru se nazývá skluz. Ve většině moderních motorů tvoří paralelní vodiče válec, kde na konci tohoto válce jsou vodiče spojeny kruhem.



Obr. 5.2 Průřez asynchronním elektromotorem

### 5.2.2 SYNCHRONNÍ MOTOR S PERMANENTNÍMI MAGNETY

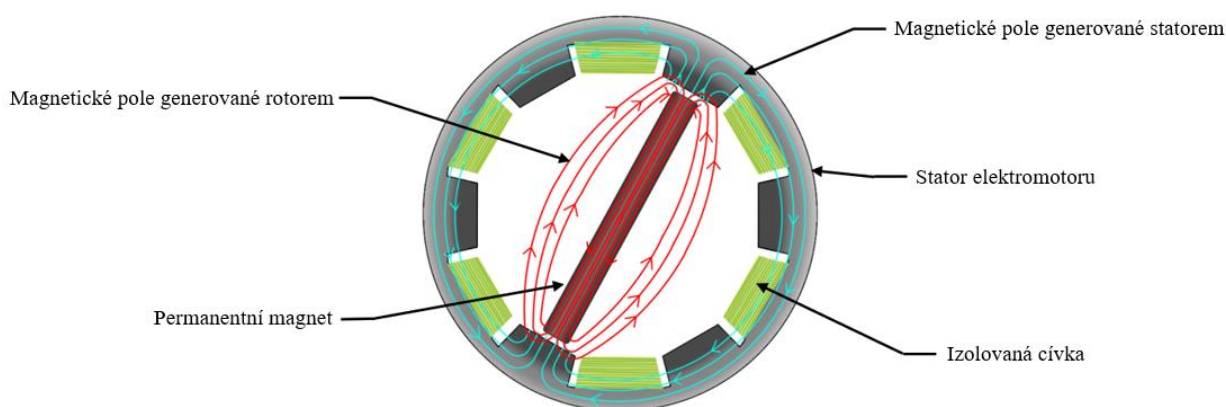
Stejně jako asynchronní motor pracuje na třífázový střídavý proud. Slouží k přeměně elektrického výkonu na mechanický výkon. Motor se nazývá synchronní, protože rychlost otáčení rotoru a magnetického pole tvořené státorem je stejná, to znamená, že zde nenastává skluz.

Stator je zde tvořen stejně jako v případě asynchronního motoru. Třífázový proud tvoří rotující magnetické pole uvnitř statoru.

Podstatný rozdíl spočívá v konstrukci rotoru. Rotor je tvořen rotorovým jádrem a permanentním magnetem (Obr. 5.3).

Permanentní magnet tvoří své vlastní magnetické pole ve vzduchové mezeře mezi státorem a rotorem. Materiál magnetu musí mít vysokou relativní permeabilitu, která označuje, v jaké míře materiál reaguje na magnetické pole. Relativní permeabilita je podíl mezi permeabilitou daného materiálu a permeabilitou vakua. V elektromotorech se nejčastěji používají slitiny neodým-železo-bor, nebo samarium-kobalt.

Rotorové jádro je vzhledem k nárokům vyráběno z magneticky měkké oceli legované křemíkem. Permanentní magnety jsou v jádru uloženy buď uvnitř, nebo zvenku. V případě automobilového průmyslu je výhodnější magnety vložit dovnitř jádra, neboť magnetické pole generované jádrem a magnety bude přizpůsobitelné podle vnějších podmínek, jako jsou rychlost jízdy a potřebný výkon vozidla.



Obr. 5.3 Průřez rotoru synchronního elektromotoru

## 5.3 REÁLNÉ PŘEVEDENÍ ELEKTROMECHANICKÉ METODY

### 5.3.1 AUDI R18 E-TRON QUATTRO

V roce 2012 závodní stáj Audi Sport použila ve svém voze (Obr. 5.4) hybridní KERS systém společnosti William's Racing. Zadní kola vozu poháněl 3,7 litrový naftový motor V6 TDI a nebyl do nich dodáván výkon z KERS systému. Přední kola byla poháněna dvěma elektromotory, ale pouze při rychlosti vyšší jak 120 km/h.

FIA a ACO (z francouzského Automobile Club de l'Ouest) stanovili omezení použití hybridních systémů. Maximální možná uložená energie mohla být 500 kJ mezi jednotlivými fázemi brzdění. Po protestech ostatních týmů rovněž FIA omezila použití KERS systému minimální rychlostí 120 km/h, pokud bude mít díky elektromotoru vozidlo náhon na všechny 4 kola, tzn. pokud by naftový motor i elektromotor poháněly pouze zadní nápravu omezení rychlosti by neplatilo.

Celý systém s označením MGU-K sestává z dvou hnacích hřídelí, motorgenerátorové jednotky (MGU), dvou planetových převodovek a elektronického setrvačnicku.

Při zpomalování vozidla, například před zatáčkou, MGU jednotka generuje elektrickou energii, která se ukládá v setrvačnicku. Naopak při zrychlování energie ze setrvačnicku pohání elektromotory na přední nápravě, planetová převodovka automaticky upraví převodový poměr, a výkon se převede na přední kola.

Setrvačnick vyvinutý společností William's Racing byl speciálně upraven na požadavky restrikcí FIA. Maximální uložená energie byla 500 kJ. Setrvačnick vyrobený z uhlíkových vláken se otáčel rychlostí maximálně 45 000 ot/min ve vysokém vakuu, aby se co nejvíce omezily ztráty třením. Uložený byl vedle sedačky řidiče pro co nejlepší rozložení váhy vozu.

Planetové převodovky byly vyvinuty společností Audi. Upravovaly převodový poměr při brzdění vozidla a jeho následnou akceleraci, pro co nejvyšší využití dodávaného výkonu. Jedna převodovka byla namontována mezi hnací hřídelí a elektromotorem na pravé straně vozu a druhá na levé straně vozu.

Motorgenerátorové jednotka byla dodána společností Bosch. Sestávala z elektromotoru chlazeného vodou a řídicí jednotky, která měla na starost správný chod motoru a distribuci

energie. Pilot vozidla mohl ovládat distribuci energie pouze nastavením jednoho ze šesti možných režimů. Řídicí jednotka podle aktivního režimu určovala, kdy bude využita energie ze setrvačnicku. Elektromotor byl schopen dodávat až 75 kW výkonu na jedno kolo, tzn. 150 kW na celou přední nápravu.



Obr. 5.4 Audi R18 e-tron Quattro [23]

### 5.3.2 AUTOBUSY A TROLEJBUSY

Již od roku 1988 byly elektromechanické metody rekuperace kinetické energie používány a testovány v hromadné městské dopravě (Obr. 5.5) v několika evropských městech. Systém byl vyvinut německou společností RENK Magnet-Motor GmbH. [24]

Celý systém sestával z dvou elektromotorů na hnacích hřídelích, jednostupňové planetové převodovky, setrvačnickového modulu a chladicího oběhu.

Synchronní elektromotory buzené permanentním magnetem při zpomalování fungovaly jako generátory elektrické energie, tzn. fungovaly jako brzdy. Dosahovaly účinnosti až 95 %. Testování probíhalo ve dvou modifikacích. Buď byl na zadní nápravě jeden 180kW elektromotor, nebo byly dva elektromotory, každý o výkonu 90 kW na každém zadním kole [24].

Setrvačnick byl vyroben z uhlíkových vláken, a pro co nejmenší energetické ztráty se otáčel ve vysokém vakuu na magnetických ložiskách. Při navrhování byl kladen velký důraz na co největší eliminaci gyroskopického momentu, který vznikal rotací setrvačnicku. Vzhledem k množství generovaného tepla byl do zařízení integrován uzavřený chladicí okruh. Ten byl konstruován tak, aby byla co nejmenší pravděpodobnost, že se do kapaliny dostanou nečistoty z okolí. Standardní výměník tepla kapalina-vzduch, uložený v zadní části autobusu, zaručoval chlazení kapaliny.

Vznětový motor zde fungoval pouze jako generátor elektrické energie k pohonu elektromotorů na zadní nápravě. Při rozjezdu autobusu vznětový motor snižoval otáčky a

chybějící energii dodával právě setrvačnickový modul. Při jízdě konstantní rychlostí byl setrvačnick dobíjen i přebytečnou energií, kterou generoval vznětový motor.

Velkou výhodou tohoto uspořádání byla možnost zmenšení vznětového motoru, což mělo za následek velké snížení hlučnosti v provozu, snížení spotřeby paliva a výrazné snížení emisí.

Pro trolejbusy (Obr. 5.6) byl po počátečním testování zvýšen počet motorů na čtyři, tzn. na každém kole jeden. Energie potřebná pro pohon byla dodávána z rozvodu elektrické sítě. [24]



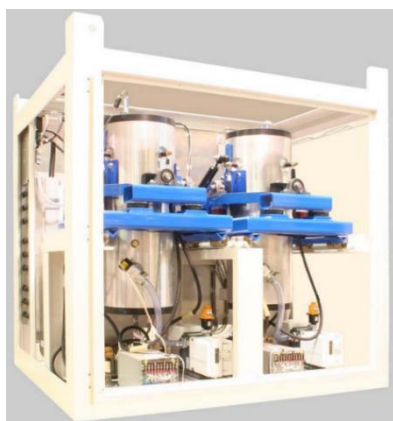
Obr. 5.5 Autobus v Mnichově vybavený setrvačnickem [24]      Obr. 5.6 Setrvačnickový modul trolejbusu [24]

### 5.3.3 POUŽITÍ V TĚŽKÉ TECHNICE

Kontejnerové jeřáby (Obr. 5.8) operující například v přístavech spotřebovávají obrovské množství energie, např. pro zdvihnutí 50t kontejneru do výšky 8 m je zapotřebí až 1 kWh energie. Energií třem hlavním motorům dodává naftový generátor. Při reverzním chodu těchto motorů se rekuperovaná energie vypouští do okolí ve formě tepla.

Texaská univerzita v Austinu navrhla rekuperační systém s ukládáním energie v setrvačnicích (Obr. 5.7) a otestovala jej na jeřábech v přístavu Los Angeles a Long Beach. Výpočet bral v úvahu, že průměrný jeřáb zvedá kontejner za minutu, pracuje 10 h/d a průměrná hmotnost kontejneru je 15 t. Dva setrvačnický mohly uložit 0,3 kWh každý, s rychlostí otáčení v rozmezí 10 000 ot/min až 20 000 ot/min [25].

Výsledky testu byly slibné. Za rok by bylo možné ušetřit až 100 MWh energie na jeden jeřáb. Zároveň s tím by bylo možné snížit emise pevných částic až o 67 %, emise oxidů dusíku o 26 % a celkovou spotřebu paliva pro pohon generátoru až o 21 % [25].



Obr. 5.7 Setrvačnicková baterie [25]

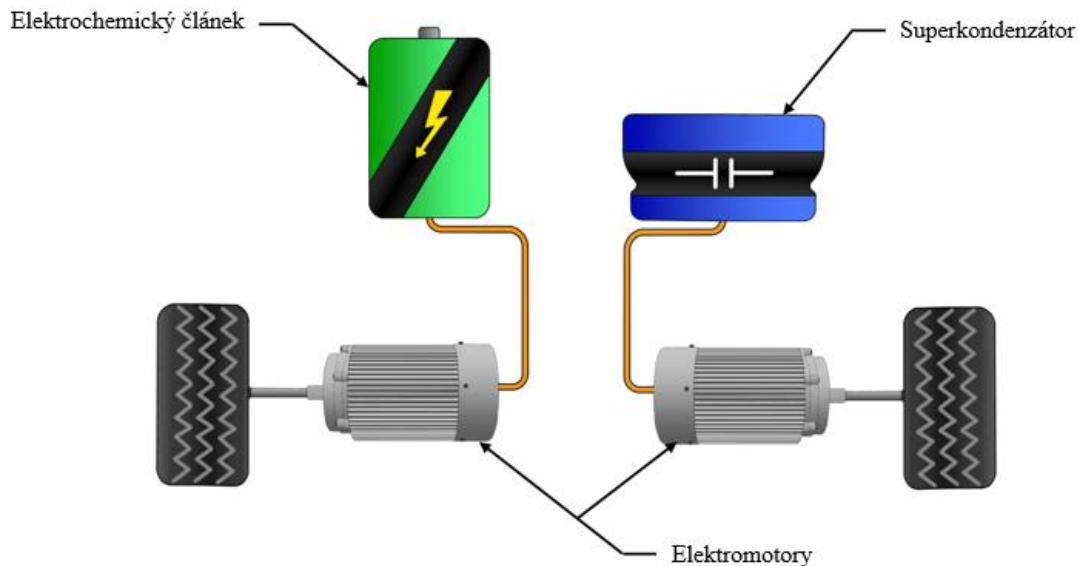
Obr. 5.8 Kontejnerový jeřáb použitý pro testování [25]



## 6 ELEKTRICKÁ METODA REKUPERACE KINETICKÉ ENERGIE

### 6.1 PRINCIP FUNKCE

Plně elektrická metoda rekuperace funguje na velmi podobném principu jako hybridní. Při zpomalování vozidla elektromotory na hnací nápravě fungují jako generátory a generují elektrickou energii. Rozdíl spočívá ve způsobu uložení energie. Na rozdíl od hybridní metody je zde elektrická energie ukládána ve formě elektrostatické energie v superkondenzátorech, nebo je přeměňována na elektrochemickou energii a ukládána v elektrochemických akumulátorech (Obr. 6.1). Superkondenzátory umožňují rychlé uložení energie, a stejně tak její rychlé využití. Elektrochemické akumulátory umožňují uchovávat energii po mnohem delší dobu a s větší účinností než superkondenzátory.



Obr. 6.1 Způsoby elektrické metody rekuperace kinetické energie

### 6.2 ELEKTROCHEMICKÉ AKUMULÁTORY

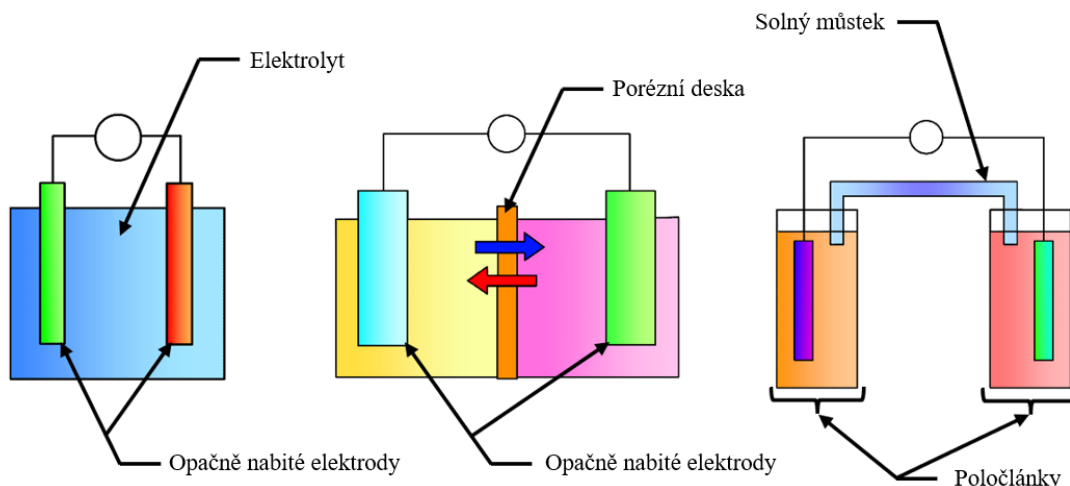
Elektrochemický akumulátor je technické zařízení, které lze opakovaně nabíjet a vybíjet. Při nabíjení akumulátoru se mění elektrická energie na elektrochemickou. Při vybíjení se naopak mění elektrochemická energie zpět na elektrickou.

Akumulátor se skládá z několika navzájem propojených částí. Hlavní částí je samotný článek. Ten se skládá z elektrod (anoda, katoda), elektrolytu a případné porézní desky, nebo solného můstku. Anoda je záporná elektroda, ze které vylučují elektrony. Katoda je kladná elektroda, která elektrony přijímá. Elektrolyt je kapalina, která je schopna vést elektrický proud. V závislosti na konstrukci baterie je společný pro obě elektrody (Obr. 6.2 a)) nebo pro každou elektrodu zvlášť. V druhém případě se elektroda a její elektrolyt označují jako poločlánek, a je třeba použít porézní desku (Obr. 6.2 b)), nebo solný můstek (Obr. 6.2 c)). Solný můstek zaručuje spojení redukčního a oxidačního poločlánku. Bez tohoto spojení by

roztok v jednom poločlánku akumuloval záporný náboj a roztok v druhém poločlánku by akumuloval kladný náboj, tudíž by zde přestala probíhat chemická reakce a tím i výroba elektrické energie. Porézní deska odděluje rozdílné elektrolyty, ale umožňuje průchod iontů.

Elektrické napětí je výsledkem chemických reakcí mezi elektrodami a elektrolytem, které způsobují rozdíl potenciálů na elektrodách.

Podle požadovaného napětí akumulátoru lze články zapojovat paralelně nebo sériově, a tím vytvořit baterii. Podle materiálu elektrod a složení elektrolytu se baterie dále rozlišují.



Obr. 6.2 a) Článek se společným elektrolytem b) Článek s porézní deskou c) Článek se solným můstkem

### 6.2.1 OLOVĚNÉ AKUMULÁTORY (Pb-PbO<sub>2</sub>)

Jedna z nejstarších používaných baterií. První použití se datuje již od druhé poloviny 19. století. Olověné akumulátory mají jednoduchou konstrukci, a proto jsou hojně využívány ještě dnes i přes svá omezení.

Jedním z velkých omezení je tzv. sulfatace (tvorba krystalů síranu olovnatého na elektrodách). To znamená, že pokud bude akumulátor ponechán po delší dobu vybitý, a to i částečně, postupně dojde k poměrně vysokému snížení kapacity baterie.

Anoda je z čistého olova (Pb) a katoda z oxidu olivčitého (PbO<sub>2</sub>). Elektrolytem je roztok kyseliny sírové s koncentrací přibližně 37 %. [26]



Nejnovější typ olověných akumulátorů jsou tzv. VRLA (z anglického Valve Regulated Lead Acid) akumulátory. Jedná se o ventilem řízené bezúdržbové akumulátory, které lze používat v jakékoliv poloze, protože zde elektrolyt již není v kapalném stavu. Elektrolyt může být buď ve formě gelu, nebo může být nasáklý v netkané textilii ze skelného vlákna. Tyto akumulátory našly uplatnění například v off-road vozidlech a motorkách, kde je větší pravděpodobnost naklonění baterie a tím i vylití elektrolytu ve starších typech olověných baterií.

Olověné akumulátory jsou využívány v různých odvětvích automobilového průmyslu. Menší baterie se používají jako zdroj elektrické energie pro startér spalovacího motoru (Obr. 6.4). Větší jako zdroj energie pro pohon elektromotorů golfových vozíků, a dalších menších vozidel a motocyklů, kde lze vždy nabít baterii po použití a zamezit tak sulfataci.

Obrovské olověné akumulátory se používají například jako zdroje elektrické energie pro nemocnice při výpadku elektrické rozvodné sítě.

### 6.2.2 NIKL-KADMIOVÉ AKUMULÁTORY (NiCd)

První nikl-kadmiový akumulátor byl zkonstruován na začátku 20. století. Na začátku druhé poloviny 20. století došlo k výraznému zlepšení metod pohlcování plynů vznikajících při nabíjení. Tím vznikly hermeticky uzavřené nikl-kadmiové baterie. Po tomto zlepšení díky své životnosti a vysoké energetické hustotě nahradily v té době používané olověné baterie v malých spotřebičích (Obr. 6.3).

Anoda je vyrobena z čistého kadmia (Cd) a katoda z oxid-hydroxidu niklitého (NiO(OH)). Mezi nejpoužívanější elektrolyty se řadí hydroxid draselný (KOH) ředěný vodou. [26]

Rovnice nabíjení:  $\text{Cd(OH)}_2 + 2\text{Ni(OH)}_2 \rightarrow \text{Cd} + 2\text{NiO(OH)} + 2\text{H}_2\text{O}$

Rovnice vybíjení:  $\text{Cd} + 2\text{NiO(OH)} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cd(OH)}_2 + 2\text{Ni(OH)}_2$

Mezi nevýhody nikl-kadmiových baterií patří vysoká hodnota samovybíjení, paměťový efekt, toxicita kadmia a s tím spojená vysoká pořizovací cena. Paměťový efekt se projevuje snižováním kapacity baterie při nabíjení již částečně nabitých baterií, tzn. při nabíjení baterie již nabitých například na 20 %.

V dnešní době jsou velké NiCd akumulátory používány například jako startovací baterie letadel. Díky relativně nízkému vnitřnímu odporu našly menší baterie uplatnění jako zdroj energie pro dálkově řízené modely letadel, lodí a automobilů.



Obr. 6.3 Nikl-kadmiový akumulátor [27]



Obr. 6.4 Olověný akumulátor automobilu [28]

### 6.2.3 NIKL-METALHYDRIDOVÉ AKUMULÁTORY (NiMH)

Nikl-metalhydridové akumulátory byly vynalezeny na konci 20. století a rychle nahradili nikl-kadmiové baterie. Oproti NiCd bateriím mají výrazně nižší paměťový efekt, i když pořád není zcela eliminován. Spolu s Li-ion bateriím patří dnes k nejpoužívanějším.

Anoda je slitina kovů, které absorbují vodík a vytváří hydridy. Nejčastěji je tvořena slitinou niklu (případně může být nikl nahrazen kobaltem, nebo manganem) a vzácného kovu, mezi které patří lanthan, cer, nebo neodým. Katoda je stejně jako u Ni-Cd baterií tvořena z oxid-hydroxidu niklitého (NiO(OH)). Elektrolytem je obvykle hydroxid draselný (KOH) ředěný vodou. [26]

Rovnice nabíjení:  $M + \text{Ni}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{MH} + \text{NiO}(\text{OH})$

Rovnice vybíjení:  $\text{MH} + \text{NiO}(\text{OH}) \rightarrow M + \text{Ni}(\text{OH})_2$

NiMH baterie mají poměrně nízkou rychlost nabíjení, což je problém například v malých spotřebičích (Obr. 6.6). Naopak u trakčních baterií (tj. baterie používané ve vozidlech) bylo dosaženo dostatečné rychlosti nabíjení. Některé automobilky úspěšně používají NiMH akumulátory (Obr. 6.5) ve svých plně elektrických vozech. Řadí se sem například Honda a Toyota. Největším problémem použití ve vozidlech je vysoká teplotní citlivost baterií. V důsledku toho je třeba použít důmyslný chladicí systém a dbát na zvýšenou kontrolu teploty.



Obr. 6.5 NiMH akumulátor elektromobilu [29]



Obr. 6.6 NiMH akumulátor pro malé spotřebiče [30]

### 6.2.4 LITHIUM-IONOVÉ AKUMULÁTORY (Li-ION)

Li-ion baterie jsou používány od konce 20. století. Dnes se řadí mezi nejpoužívanější a řada společností, mezi kterými vede Panasonic, investují obrovské částky do vývoje nových technologií. Do roku 2023 společnost Panasonic plánuje investovat přibližně 15 miliard korun do vývoje nové lithium-ionové baterie, která bude mít 4680 článků, do nového vozu Tesly. [31]

Název lithium-ion nepopisuje dané materiály elektrod. Existuje celá řada druhů, mezi které patří například LCO (lithium-kobalt-oxid), LMO (lithium-mangan-oxid), NCA (lithium-nikl-kobalt-hliník), atd. Stejně tak se podle materiálů použitých v článku mění chemické rovnice nabíjení a vybíjení. [26]



Díky svým vlastnostem se dnes používají v drtivé většině přenosných zařízení (Obr. 6.7), jako jsou notebooky a telefonní zařízení. V posledních letech se čím dál více používají jako zásobárny energie elektrických vozidel (Obr. 6.8). Nevýhodou použití je omezená bezpečnost baterie. Při přebíjení baterie bez dostatečného odvodu tepla existuje riziko vzplanutí baterie. Díky tomu je třeba do vozidel s Li-ion baterií instalovat pokročilý systém sledování teploty a odvodu tepla, který výrazně zvyšuje cenu.



Obr. 6.8 Li-ion baterie elektromobilu [32]



Obr. 6.7 Li-ion baterie do malých spotřebičů [33]

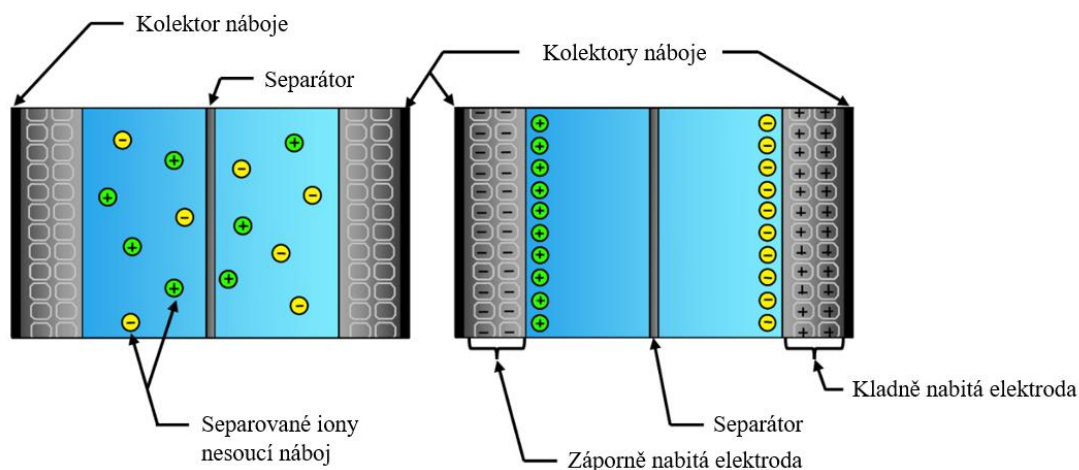
### 6.3 VYSOKOENERGETICKÉ KONDENZÁTORY (SUPERKAPACITOR)

Superkondenzátor je technické zařízení, které lze opakovaně nabíjet a vybíjet vysokou rychlostí. Akumuluje energii ve formě elektrostatické, tzn. není třeba měnit formu energie pro uložení. V dnešní době existují 2 typy superkondenzátorů.

#### 6.3.1 ELEKTROCHEMICKÝ DVOUVRSTVÝ KONDENZÁTOR (EDLC)

Teoretický základ dvouvrstvého kondenzátoru položil již v roce 1853 německý fyzik Hermann von Helmholtz. V roce 1957 společnost General Electric Company patentovala první návrh dvouvrstvého kondenzátoru. Podobný typ dvouvrstvého kondenzátoru poté náhodou znovu objevila společnost Standard Oil v roce 1966, když pracovala na návrhu palivového článku. Společnost NEC od nich poté zakoupila licenci pro komerční použití a v roce 1978 uvedla superkondenzátory na trh. [34]

EDLC (Obr. 6.9) fungují na principu elektrochemické dvojvrstvy. To je útvar složený ze dvou opačně nabitých vrstev. K nabitému povrchu elektrody jsou přitahovány ionty opačného náboje, tzn. ke kladně nabité elektrodě jsou přitahovány záporně nabití ionty a naopak. Energie je uchovávána jako náboj elektrostaticky vázaný k elektrodě.



Obr. 6.9 Průřez EDLC kondenzátorem

Vlastnosti kondenzátoru nejvíce ovlivňuje materiál elektrod, struktura povrchu elektrod a druh elektrolytu. Mezi nejpoužívanější materiál elektrod je řazen uhlík a jeho různé variace, oxidy kovů a vodivé polymery. Uhlík je používán ve formě uhlíkových vláken, uhlíkových nanotrubic a v poslední době nejvíce ve formě aktivního uhlí. Aktivní uhlí je vysoce porézní forma uhlíku s velmi vysokým povrchem vzhledem k hmotnosti (1 gram může mít až 3 000 m<sup>2</sup>). [35] Přestože vodivost aktivního uhlí je velice nízká, pro aplikaci v kondenzátorech je dostačující. V posledních několika letech je aktivní uhlí vyráběno ve formě prášku ze skořápek kokosových ořechů, které je více pórovité než při výrobě ze dřeva. Samotná elektroda je pak ve formě lisovaného aktivního uhlí, nebo je samotná elektroda pouze potažena práškovým aktivním uhlím. [36]

Elektrolytem je vodivý chemický roztok, který nijak nereaguje s materiály elektrod či separátoru. V dnešní době jsou používány 2 druhy – organický a vodný. Organický elektrolyt dosahuje vyššího napětí (2-2,5 V) a má vyšší teplotní rozsah použití. [36] Mezi běžné organické roztoky patří acetonitril (CH<sub>3</sub>CN) a propylenkarbonát (C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub>). Oproti tomu vodné elektrolyty dosahují nižšího napětí (1 V), ale mají lepší elektrickou vodivost. Obvykle se používá voda ošetřená buď kyselinou sírovou (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), hydroxidem draselným (KOH), nebo solemi jako chloristan sodný (NaClO<sub>4</sub>) a chloristan lithný (LiClO<sub>4</sub>). [37]

Poslední částí superkondenzátoru je separátor, který odděluje dvě elektrody od sebe, a tím zabraňuje zkratu. Stejně jako elektrolyt, musí být chemicky inertní, tzn. nesmí reagovat s ostatními materiály kondenzátoru. Zároveň je důležité, aby umožnil průchod iontů. Materiál separátoru je dán druhem elektrolytu. Pro organické elektrolyty jsou nejčastěji používány papírové, nebo polymerové separátory. Pro vodné roztoky se obvykle vybírá separátor ze skleněných, nebo keramických vláken. [37]

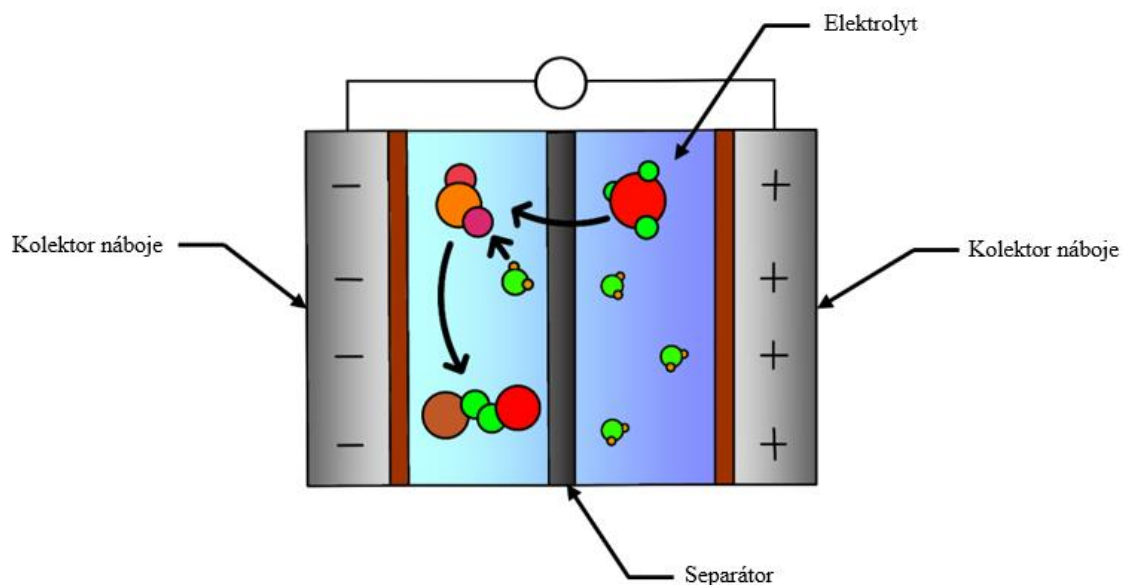
### 6.3.2 PSEUDOKONDENZÁTOR

Také nazýván jako Faradayův, nebo asymetrický kondenzátor. Oproti EDLC zde už probíhá chemická reakce – elektrody reagují s elektrolytem. Konstrukčně je velmi podobný chemickým akumulátorům. Náboj je uložen přenosem elektronového náboje mezi elektrodou a elektrolytem.

Oproti EDLC jsou schopny akumulovat násobně větší náboj, ale také se násobně rychleji opotřebovávají a jsou více náchylné na provozní teplotu.

Kapacita těchto kondenzátorů je popsána tzv. pseudokapacitou. Při nabíjení pseudokondenzátoru dochází k plně vratné oxidaci a redukci, kterých se účastní oxidy přechodných kovů přítomné v elektrolytu, kde elektrodě je přidán, nebo odebrán elektron. Oxidy kovů netvoří žádné chemické vazby s elektrodou, dochází pouze k přenosu náboje.

Pseudokondenzátory (Obr. 6.10) jsou obvykle kombinovány s elektrochemickými dvouvrstvými kondenzátory. Spolu pak tvoří zvláštní druh superkondenzátorů.



Obr. 6.10 Průřez pseudokondenzátoru

## 6.4 REÁLNÉ PROVEDENÍ ELEKTRICKÉ METODY

### 6.4.1 ŠKODA ENYAQ IV

V září roku 2020 česká automobilka Škoda představila své první plně elektrické SUV Škoda ENYAQ iV (Obr. 6.12). Vůz je vyráběn ve čtyřech variantách – podle kapacity baterie a podle druhu pohonu kol.

Lithium-ionové baterie jsou uloženy v podlaze mezi nápravami, to zaručuje nízké těžiště a dostatečné rozložení váhy na nápravách. Baterie jsou výrobcem dodávány ve dvou variantách – s kapacitou 62 kWh (58 kWh využitelných), nebo 82 kWh (77 kWh využitelných). Škoda garantuje záruku na baterie po dobu 8 let, nebo 160 000 km. Zároveň si stanovila cíl, že

baterie neztratí více jak 20 % kapacity po 10 letech za předpokladu maximálního nájezdu 15 000 km za rok. [38]

Pohon je realizován pomocí synchronního elektromotoru s permanentními magnety (Obr. 6.11) na zadní nápravě o výkonu 132 kW, při vybavení baterií s kapacitou 62 kWh. Druhou možností je pohon na zadní nápravu pomocí elektromotoru o výkonu 150 kW, pro baterii s kapacitou 82 kWh. Dvě dražší konfigurace vozu mají pohon na všechny čtyři kola a jsou vybaveny baterií o kapacitě 82 kWh. Elektromotor na přední nápravě má výkon 45 kW, nebo 75 kW pro konfiguraci Škoda ENYAQ RS iV.

Rekuperace kinetické energie probíhá při zpomalování vozidla. Elektromotor zde funguje jako generátor a brzdí vozidlo, konvenční brzdy se zapojí až při prudším zpomalení. Energie je uchovávána v Li-ion baterii vozu. Rekuperace probíhá při každém povolení plynového pedálu a její intenzitu lze nastavit pomocí pedálů umístěných pod volantem, nebo pomocí kontrolního panelu. Spotřeba ve městě se díky rekuperačnímu systému může snížit z 20 kWh/100 km až na 13 kWh/100 km. [39]



Obr. 6.12 Škoda ENYAQ iV [40]



Obr. 6.11 Elektromotor Škody ENYAQ iV 195 kW [40]

#### 6.4.2 PEUGEOT E-EXPERT

V roce 2020 francouzská automobilka Peugeot světu představila nový dodávkový automobil Peugeot e-Expert (Obr. 6.13). Vůz je vyráběn s naftovým spalovacím motorem, nebo synchronním motorem s permanentními magnety.

Lithium-ionové baterie umístěné mezi nápravami, z důvodu co nejlepšího možného rozložení váhy, se dodávají ve dvou variantách – menší s kapacitou 50 kWh a větší s kapacitou 75 kWh. Maximální dojezd vozidla se velmi liší v závislosti na hmotnosti nákladu vozidla. Dojezd samotného vozidla s řidičem je s menší baterií 238 km a s větší baterií 340 km. Při jízdě s nákladem o hmotnosti 1 t, průměrnou rychlostí 90 km/h se dojezd sníží průměrně o 75 km. [41]

Synchronní elektromotor s permanentními magnety (Obr. 6.14) má výkon 100 kW s maximálním točivým momentem 260 Nm. Je umístěn na přední nápravě a má přednastavené

3 jízdní režimy. Režim „eko“ má limitovanou maximální rychlost, prodlužuje maximální dojezd a omezuje výkon motoru na 60 kW. Při režimu „normal“ je výkon omezen na 80 kW. Při režim „power“ je elektromotor nastaven na maximální výkon 100 kW, a je určen převážně pro jízdu s nákladem.

Rekuperace kinetické energie je uskutečňována elektromotorem na přední nápravě. Při zpomalování vozidla elektromotor funguje jako generátor a vytváří elektrickou energii. Ta je ukládána do Li-ion baterií pro pozdější použití. Intenzitu rekuperace energie je možné nastavit na 2 režimy. První režim simuluje jízdní podmínky vozidla se spalovacím motorem, tzn. brzdění je téměř nepostřehnutelné. Druhý režim s názvem „Brake“ umožňuje řízení pomocí jednoho pedálu, tzn. elektromotor zpomaluje vozidlo při každém uvolnění plynového pedálu. Peugeot uvádí, že systém je schopen prodloužit dojezd až o 15 %. [41]



Obr. 6.13 Peugeot e-Expert [41]



Obr. 6.14 Elektromotor Peugeot e-Expert 100 kW [41]

### 6.4.3 LAMBORGHINI SIÁN FKP

V září 2019 italská automobilka Lamborghini představila exkluzivní hybridní supersport Lamborghini Sián FKP (Obr. 6.15), limitovaný na 63 vyrobených vozidel. V době představení to byl nejrychlejší hybridní vůz v historii. Z 0 na 100 km/h je schopen zrychlit za méně než 2,8 sekundy. Maximální rychlost je elektronicky omezena na 350 km/h.

Lamborghini Sián FKP kombinuje atmosférický V12 6,5 l spalovací motor o výkonu 577 kW a elektromotor o výkonu 25 kW. Spalovací motor je umístěn v zadní části vozu za řidičem, pro co nejlepší rozmístění váhy. 48V elektromotor je umístěn v převodovce. Motory spolu spolupracují po celou dobu jízdy. Při akceleraci vozu z klidového stavu má elektromotor lepší reakční čas, a díky tomu Sián zrychluje ještě před tím, než spalovací motor dodá točivý moment na kola. Při řazení převodovky točivý moment dodávaný spalovacím motorem poklesne, a zde elektromotor dodá požadovaný výkon, než spalovací motor znovu začne dodávat výkon. Díky tomu má průběh točivého momentu téměř konstantní charakter.

Místo elektrochemických Li-ion baterií je vůz vybaven superkondenzátory. Oproti dříve používaným elektrochemickým článkům jsou superkondenzátory při stejné hmotnosti článku schopny uložit a zpětně využít energii až 3x rychleji, a mají výrazně vyšší životnost. V tomto případě se jedná o 48V systém umožňující špičkové proudy až 600 A. [42] Hmotnost celého



mild-hybridního systému je přibližně 34 kg, což je výrazně méně než jiné dnes používané systémy s výjimkou systémů Formule 1.

Rekuperace kinetické energie probíhá při zpomalování vozu pomocí elektromotoru, který zde funguje jako generátor. Při prudkém brždění se zapojují karbon-keramické brzdy a rekuperace energie neprobíhá. Energie se ukládá do EDLC superkondenzátorů. Tok elektrické energie je symetrický, pro stejnou účinnost během cyklů nabíjení a vybíjení, bez přehřívání.

Rekuperovaná energie je spotřebovávána při prudkých zrychleních, například za zatáčkou, a právě při řazení převodovky.

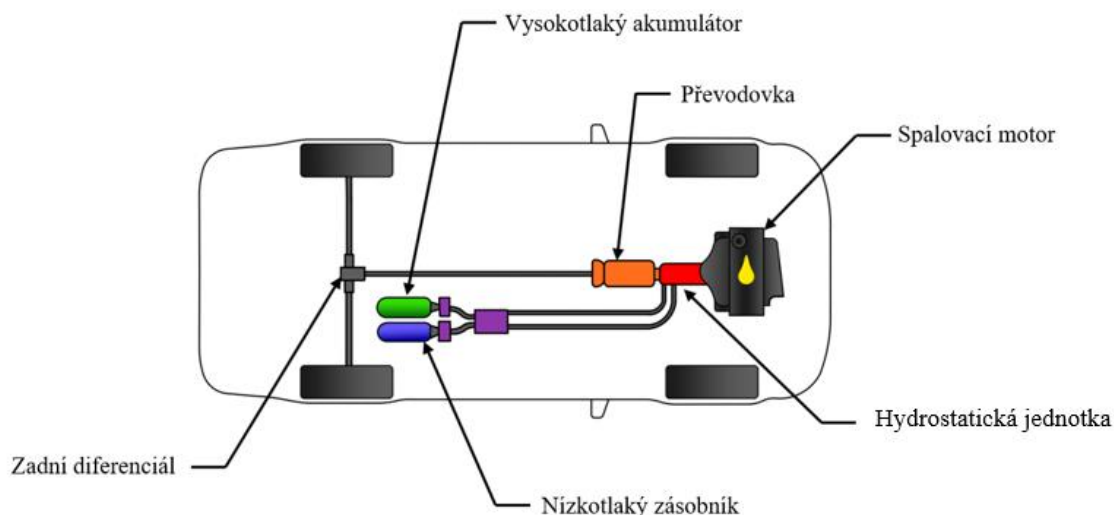


Obr. 6.15 Lamborghini Sián [42]

## 7 HYDROSTATICKÁ METODA REKUPERACE KINETICKÉ ENERGIE

### 7.1 PRINCIP FUNKCE

Hydrostatický systém (Obr. 7.1) ukládá brzdňou energii do hydrostatického tlakového zásobníku. Při zpomalování vozidla axiální čerpadlo uložené na hnací hřídeli přečerpává kapalinu ze zásobníku do tlakové nádoby, ve které je uložený vak s plynem. Kapalina do dané míry stlačuje vak s plynem, a tím ukládá energii. Energie je tedy uchovávána ve formě potenční energie ve stlačeném plynu. Při následné akceleraci vozidla axiální čerpadlo uvolní tlak na vak s plynem, který se následně začne rozpínat a vytlačovat kapalinu zpět do zásobníku. Čerpadlo je roztáčeno pomocí proudící kapaliny a předává točivý moment hnací hřídeli a velkou měrou tím odlehčuje spalovací motoru.



Obr. 7.1 Schéma paralelního zapojení hydrostatického rekuperačního systému

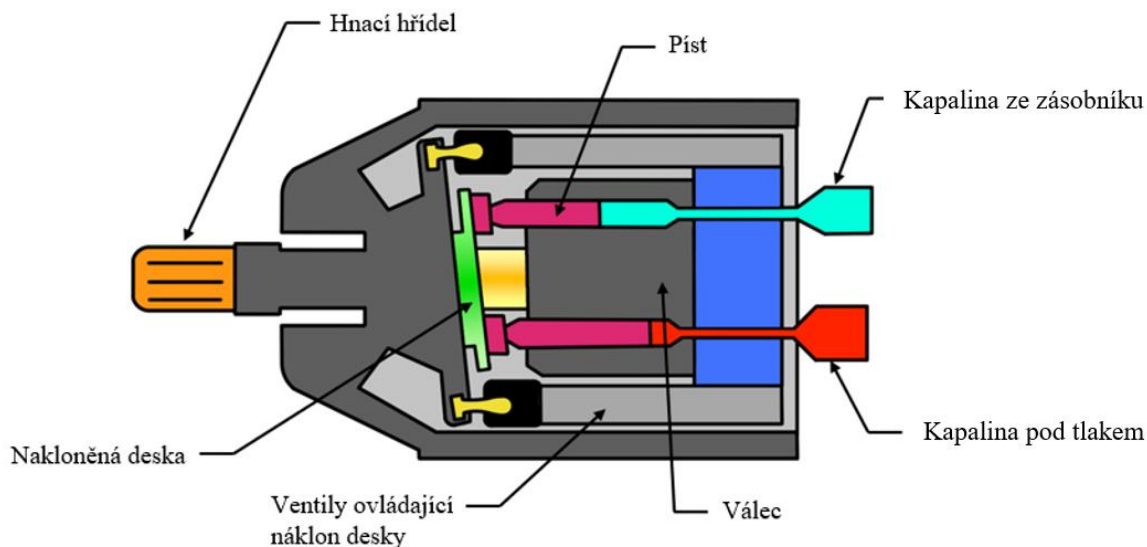
### 7.2 ČÁSTI SYSTÉMU

#### 7.2.1 HYDROSTATICKÁ JEDNOTKA HM/HG

Hydrostatická jednotka principiálně funguje podobně jako elektromotor, s tím rozdílem, že není poháněna elektrickou energií, ale hydraulickou energií. Zkratka HM/HG označuje hydromotor/hydrogenerátor. Jednotka je spojena s mechanickým hnacím ústrojím vozu přes převodovku. Při zpomalování přeměňuje axiální pístové čerpadlo kinetickou energii na hydraulickou energii čerpáním kapaliny ze zásobníku do tlakové nádoby.

V rekuperačním systému společnosti Bosch je použito axiální pístové čerpadlo A4VSO (Obr. 7.2). Konstrukce je speciálně upravena pro možnost nainstalovat rekuperační systém na téměř každé vozidlo. [43]

Točivý moment je přenášen na hnací hřídel čerpadla. Válec čerpadla se otáčí spolu s hnací hřídelí, a spolu s válcem rotují i písty čerpadla, které jsou připevněny na nakloněné desce. V průběhu otáčení písty postupně nasávají a tlakují kapalinu. Množství kapaliny lze ovládat náklonem desky.

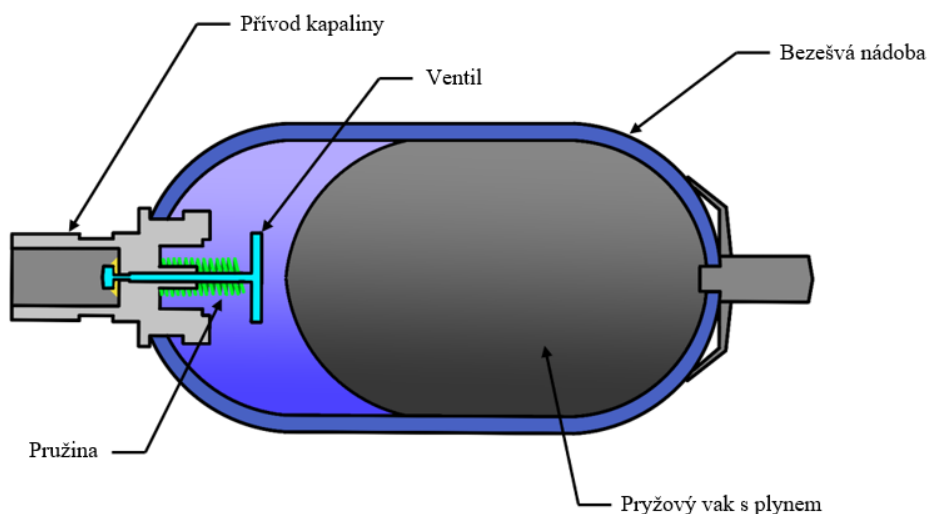


Obr. 7.2 Axiální pístové čerpadlo

### 7.2.2 TLAKOVÁ NÁDOBA

Použitá nádoba je označována jako hydrostatický vakový akumulátor. Konstrukce vakového akumulátoru (Obr. 7.3) je poměrně jednoduchá. V bezešvé nádobě z pevné oceli je pryžový vak s inertním plynem, obvykle dusíkem ( $N_2$ ), který dokonale odděluje kapalinu od plynu. Kapalina do nádoby proudí přes ventil, který je otevírán tlakem kapaliny a regulován pružinou. Maximální dovolený tlak nádoby o objemu 50 l je stanoven výrobcem, v případě systému Bosch Rexroth na 330 bar.

Nízkotlaká nádoba plní funkci zásobníku hydraulické kapaliny, často je používán hydraulický olej.



Obr. 7.3 Vakový akumulátor



### 7.2.3 OSTATNÍ KOMPONENTY

Celý systém je ovládán elektronickou řídicí jednotkou (Obr. 7.4). Ta má na starost určit, kdy je vhodné zapojit HM/HG jednotku a odlehčit motoru, případně zda je vhodné nabít hydrostatický akumulátor. Řídicí jednotka ovládá pouze blok ventilů (Obr. 7.6).

Blok ventilů ovládá sklon naklápěcí desky, a polohu upouštěcího ventilu (Obr. 7.5). Upouštěcí ventil reguluje tlak v láhvi, a v případě nebezpečí porušení láhve, například při nárazu vozidla, vypustí všechnu kapalinu.



Obr. 7.4 Řídicí jednotka Bosch [44] Obr. 7.5 Upouštěcí ventil Bosch [45] Obr. 7.6 Blok ventilů Bosch [46]

## 7.3 REÁLNÉ PROVEDENÍ HYDROSTATICKÉ METODY

### 7.3.1 VOLVO B10R

V roce 1984 společnost Volvo ve spolupráci se společností Bus Corporation testovala použití hydrostatické metody rekuperace kinetické energie. Autobusy Volvo B10R (Obr. 7.7) byly testovány v hromadné dopravě města Kodaň a Stockholm. Ve Stockholmu testování probíhalo na dvou vozidlech, z toho pouze na jednom byla testována hydrostatická metoda, v Kodani bylo autobusů testováno pět.

V autobusech byla použita paralelně zapojená metoda rekuperačního systému. To znamená, že nízkotlaká a vysokotlaká nádoba jsou uloženy vedle sebe. HM/HG jednotka byla zapojena mezi spalovacím motorem a manuální převodovkou.

Testování probíhalo na trase dlouhé 8 km, na které je 50 zastávek. Kapacita akumulátorů byla při maximálním tlaku 35 MPa přibližně 0,4 kWh, tzn. že autobus byl při plném nabití akumulátoru schopen ujet až 400 m po trase bez stoupání. Právě díky častému zastavování na krátké trase se uplatnila rekuperace energie v plném rozsahu. To mělo v důsledku snížení spotřeby vozidla v průměru až 25 %. To znamenalo, že ročně jeden vůz vybavený tímto systémem ušetřil přibližně 6 000 l paliva. [47]



Obr. 7.7 Volvo B10R [48]

### 7.3.2 BOSCH REXROTH VE VOZIDLECH PRO SVOZ KOMUNÁLNÍHO ODPADU

V roce 2009 společnost Bosch Rexroth započala terénní testování svého hydrostatického rekuperačního systému. Testování probíhalo na 30 vozech svozu komunálního odpadu společnosti Haller Umweltsysteme – 10 v New Yorku a 20 v Berlíně. Vozy byly testovány v běžném provozu po dobu jednoho roku, v různých částech města, aby byly zohledněny různé faktory.

Ve vozech byla použita paralelní metoda zapojení rekuperačního systému, o celkové hmotnosti 500 kg. V jedné větvi zapojení byly uloženy tlakové láhve. HG/MG jednotka byla zapojena mezi automatickou převodovkou a zadním diferenciálem.

Hmotnost vozidla v nezatíženém stavu je 16 t, a v plně zatíženém stavu maximálně 26 t. Místo jednoho hydrostatického akumulátoru jsou v každém voze nainstalovány dva, každý o objemu 32 l. Maximální tlak akumulátoru byl stanoven na 325 bar, to znamená, že maximální uložená energie je 550 kJ. V případě plně nabitého akumulátoru je hydromotor schopen vyvinout výkon až 230 kW a maximální točivý moment 1113 Nm. [49]

V případě pravidelných zastávek, od sebe vzdálených přibližně 100 m, je rekuperační systém schopen ušetřit až 25 % paliva. To znamená, že ročně systém ušetří 4095 l paliva. [49]



Obr. 7.8 Vozidlo pro svoz komunálního odpadu [43]

### 7.3.3 HYDROSTATICKÁ REKUPERACE V MOTOCYKLU

Rekuperační systémy u motocyklů jsou konstruovány zcela jinak než u automobilů. Při brzdění motocyklu se váha přenáší velkou mírou dopředu a zadní brzdy fungují jen v omezené míře. Naopak při akceleraci se pro pohon využívají převážně zadní kola. Rekuperační systémy proto nejsou příliš efektivní.

Společnost Honda použila hydraulické systémy již dříve v motocyklu DN-01. V tomto případě hydraulický systém nahrazoval řemeny a ozubená kola převodovky, a tvořil tak plně automatickou převodovku s plynule měnitelným převodem.

V roce 2021 si Honda podala patent na hydrostatický rekuperační systém pro použití na předních kolech. V patentu je popsána hydrostatická jednotka zabudovaná v předním kole. Písty hydraulického čerpadla jsou namontované na naklápěcí desce, s proměnným úhlem, tzn. že je možné ovládat množství čerpané kapaliny. Hydrostatická jednotka může fungovat ve dvou módech – motor při rozjíždění, generátor při brzdění. [50]

V převodovce je umístěna další hydrostatická jednotka, která převádí pohyb kapaliny zpět na rotační pohyb. Jednotky jsou propojeny hadicemi. Díky tomuto uspořádání by mohl mít motocykl pohon na obě kola. [50]

V současné době jde pouze o teoretický návrh.



Obr. 7.9 Honda DN-01 [50]



Obr. 7.10 Hydraulická převodovka DN-01 [51]

## 8 POROVNÁNÍ METOD

### 8.1 POROVNÁNÍ AKUMULÁTORŮ

Měrná energie (Wh/kg) je jednou z hlavních charakteristik baterií. Vyjadřuje kapacitu akumulátoru na jednotku hmotnosti. Někdy se udává také hustota energie (Wh/m<sup>3</sup>), ta vyjadřuje kapacitu akumulátoru na jednotku objemu. Z těchto hodnot lze při známé požadované kapacitě vypočítat orientační hmotnost a prostorovou náročnost požadovaného akumulátoru.

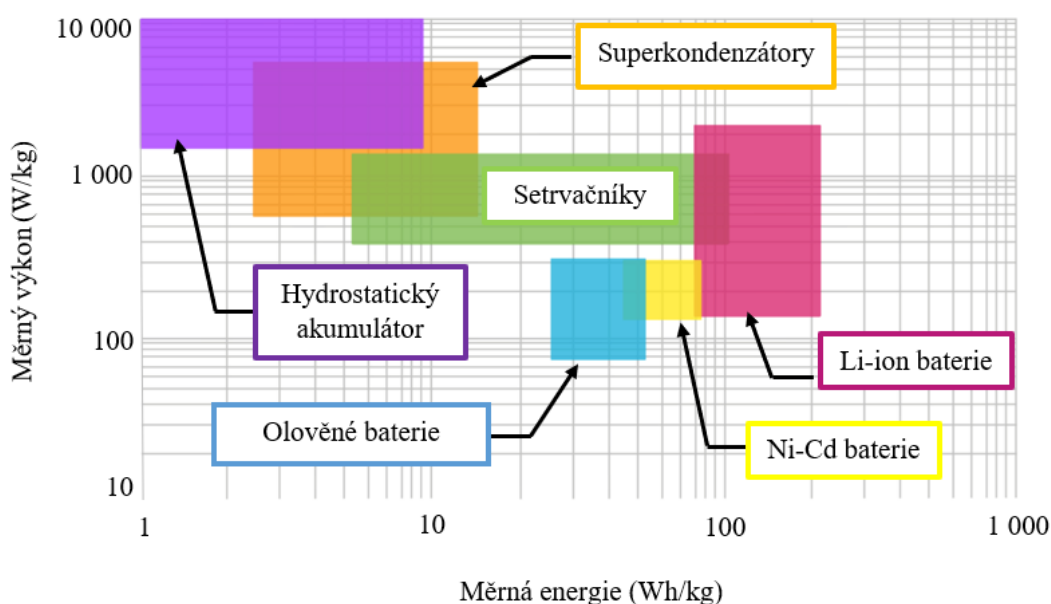
Tabulka 1 Typické měrné energie jednotlivých akumulátorů [52], [53], [54], [55], [56]

|                       | Setrvačnick | Li-ion baterie | Olověné baterie | NiCd baterie | NiMH baterie | Hydrostatický akumulátor | Superkondenzátor |
|-----------------------|-------------|----------------|-----------------|--------------|--------------|--------------------------|------------------|
| Měrná energie (Wh/kg) | 5 až 80     | 75 až 200      | 25 až 50        | 45 až 80     | 45 až 85     | 0,2 až 8                 | 0,05 až 15       |

Měrný výkon (W/kg) vyjadřuje typický výkon akumulátoru na jednotku hmotnosti. Někdy se také udává hustota výkonu (W/m<sup>3</sup>). Čím vyšší je měrný výkon tím více energie je akumulátor schopný vydat při daném objemu (hmotnosti) za jednotku času. U vozidel tato hodnota udává například maximální možné zrychlení vozu.

Tabulka 2 Typické měrné výkony jednotlivých akumulátorů [52], [55], [56]

|                    | Setrvačnick  | Li-ion baterie | Olověné baterie | NiCd baterie | NiMH baterie | Hydrostatický akumulátor | Superkondenzátor |
|--------------------|--------------|----------------|-----------------|--------------|--------------|--------------------------|------------------|
| Měrný výkon (W/kg) | 400 až 1 500 | 150 až 2 000   | 75 až 300       | 150 až 300   | 150 až 320   | 1800 až 9800             | 500 až 5 000     |

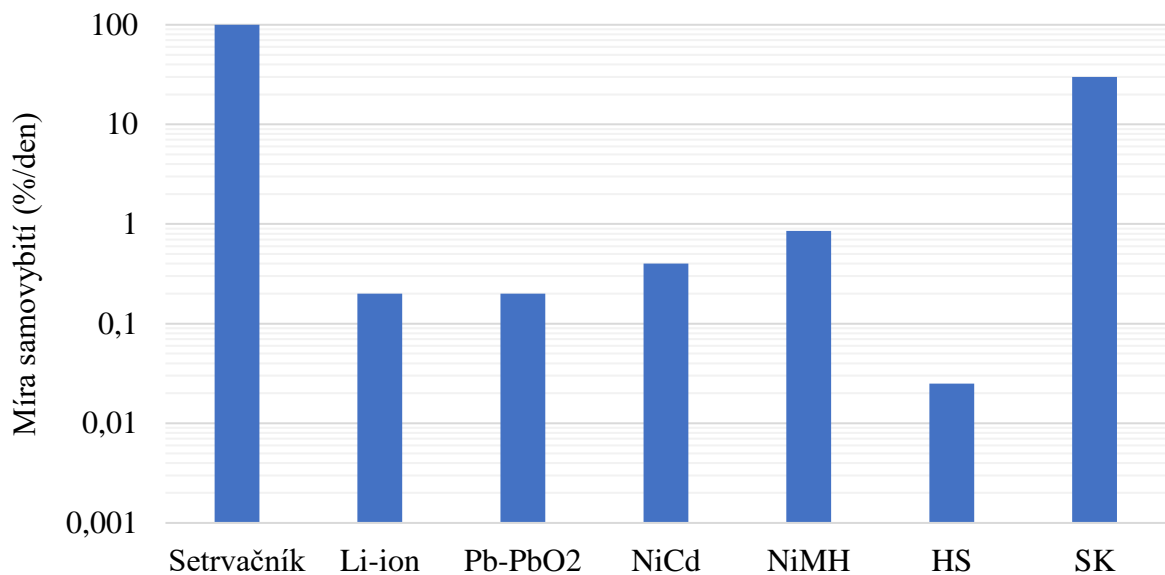


Graf. 1 Zobrazení závislosti měrného výkonu na měrné energii

Samovybití je jev, při kterém se samovolně snižuje energie uložená v akumulátoru. Míra samovybití (%/den) vyjadřuje, jak moc se akumulátor vybije za jeden den, aniž by z něj byla jakýmkoliv způsobem cíleně odebírána energie. Tuto charakteristiku akumulátoru ovlivňuje velké množství okolních vlivů, jako je například okolní teplota, kvalita zpracování atd.

Tabulka 3 Typické hodnoty míry samovybití jednotlivých akumulátorů [52], [56]

|                         | Setrvačnick | Li-ion baterie | Olověné baterie | NiCd baterie | NiMH baterie | Hydrostatický akumulátor (HS) | Superkondenzátor (SK) |
|-------------------------|-------------|----------------|-----------------|--------------|--------------|-------------------------------|-----------------------|
| Míra samovybití (%/den) | 100         | 0,1 až 0,3     | 0,1 až 0,3      | 0,2 až 0,6   | 0,5 až 1,2   | 0 až 0,05                     | 20 až 40              |

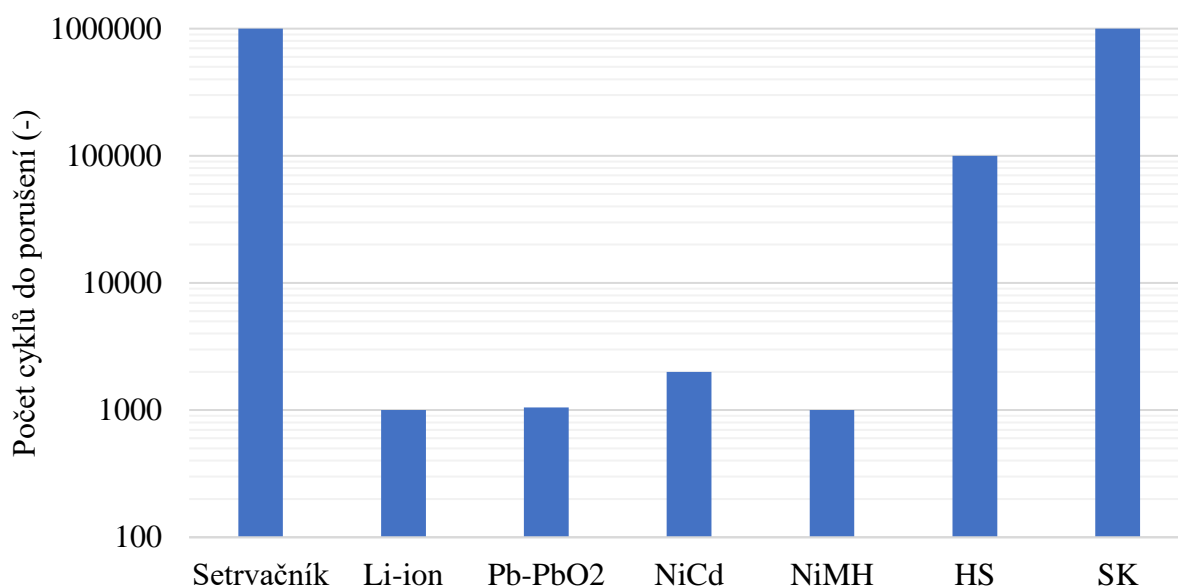


Graf. 2 Zobrazení průměrných hodnot samovybití akumulátorů

Počet cyklů (-) je číslo, které udává životnost akumulátoru. Charakterizuje počet opakování nabití a vybití akumulátoru před jeho poškozením, nebo přílišným opotřebením. Stejně jako míra samovybití závisí na spoustě faktorech, mezi které patří hlavně provozní podmínky (vibrace, nečistoty v okolí...) a okolní teplota.

Tabulka 4 Typický počet cyklů jednotlivých akumulátorů [52], [56], [57]

|                 | Setrvačnick      | Li-ion baterie | Olověné baterie | NiCd baterie   | NiMH baterie | Hydrostatický akumulátor (HS) | Superkondenzátor (SK) |
|-----------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|--------------|-------------------------------|-----------------------|
| Počet cyklů (-) | $10^5$ až $10^7$ | 800 až 1 200   | 700 až 1500     | 1 500 až 2 500 | 750 až 1 250 | $10^4$ až $10^6$              | $10^5$ až $10^7$      |

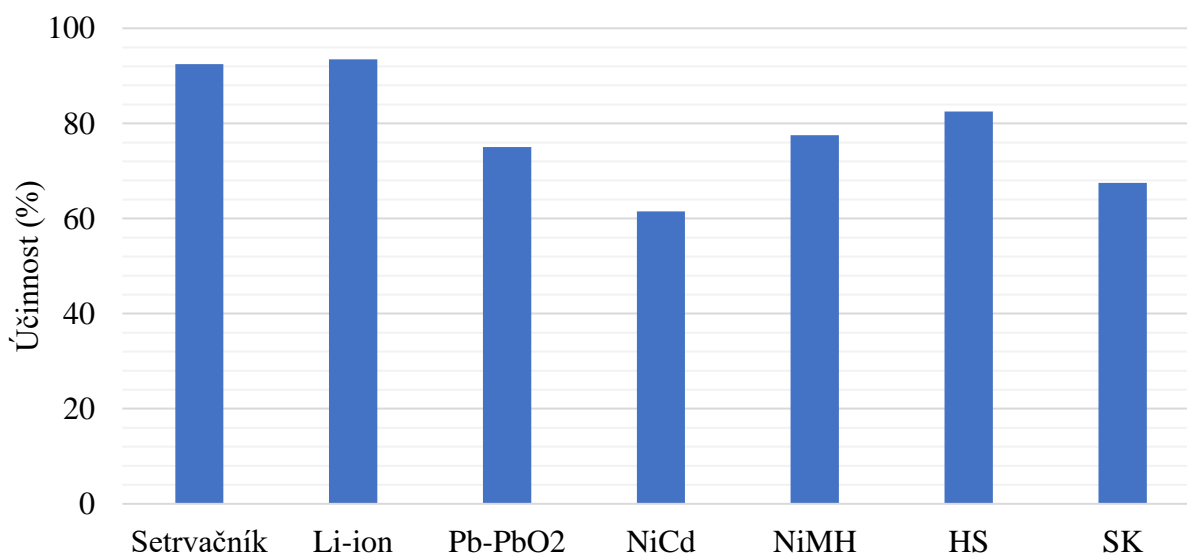


Graf. 3 Zobrazení průměrných hodnot počtu cyklů do porušení akumulátorů

Účinnost akumulátoru (%) udává poměr mezi energií odebranou z akumulátoru a energií vloženou do akumulátoru. Čím vyšší účinnost tím menší jsou ztráty energie způsobené jejím přenosem, či způsobem jejího uložení.

Tabulka 5 Typické hodnoty účinností jednotlivých akumulátorů [52], [56], [57]

|              | Setrvačnick | Li-ion baterie | Olověné baterie | NiCd baterie | NiMH baterie | Hydrostatický akumulátor (HS) | Superkondenzátor (SK) |
|--------------|-------------|----------------|-----------------|--------------|--------------|-------------------------------|-----------------------|
| Účinnost (%) | 90 až 95    | 90 až 97       | 70 až 80        | 60 až 83     | 65 až 90     | 75 až 90                      | 55 až 80              |



Graf. 4 Zobrazení průměrných hodnot účinností akumulátorů

## 8.2 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH REKUPERAČNÍCH SYSTÉMŮ

Porovnání jednotlivých systému je poměrně složité. Nelze porovnávat například osobní vozidlo při jízdě na dálnici, které jede konstantní rychlostí, a vozidlo pro svoz komunálního odpadu, které zastavuje každých 50 metrů a váží mnohem více.

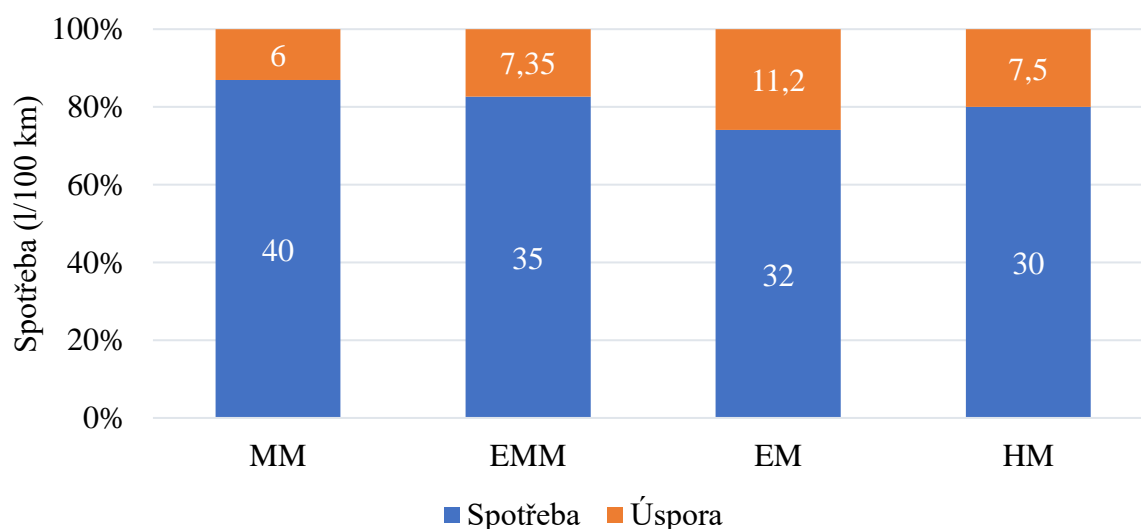
Porovnání je možné pro systémy používané v autobusech. Pouze v tomto odvětví jsou použity všechny metody rekuperace kinetické energie vozidla. Přesto by pro přesné srovnání bylo třeba provést měření každého vozidla na stejné trase za stejných podmínek (např. množství cestujících, frekvence zastávek, hmotnost samotného vozidla atd.). Proto lze porovnání brát pouze orientačně.

Hodnoty jsou vypočteny pro průměrné ceny paliv platné ke dni 28. 02. 2022 – nafta 38 Kč/l, CNG 30 Kč/m<sup>3</sup>.

Tabulka 6 Porovnání rekuperačních metod u autobusů [19], [24], [47], [58], [59], [60]

| Druh rekuperace                                    | Mechanická (MM)        | Elektromechanická (EMM)  | Elektrická (EM) | Hydrostatická (HM) |
|--|------------------------|--------------------------|-----------------|--------------------|
| Vozidlo  | Euro VI StreetLite bus | München magnet motor bus | Volvo 7900      | Volvo B10R         |
| Průměrná spotřeba paliva bez rekuperace (l/100 km) | 40                     | 35                       | 32              | 30                 |
| Cena (Kč/100 km)                                   | 1520                   | 1330                     | 1216            | 1140               |
| Účinnost ve městě (%)                              | 15                     | 21                       | 35              | 25                 |
| Úspora (Kč/100 km)                                 | 228                    | 279,3                    | 425,6           | 285                |
| Úspora paliva (l/100 km)                           | 6                      | 7,35                     | 11,2            | 7,5                |
| Produkovávané emise CO <sub>2</sub> (g/km)         | 1633                   | 1475                     | 1633            | 1633               |
| Snížení emisí (g/km)                               | 244,95                 | 309,75                   | 571,55          | 408,25             |

Porovnání spotřeby a úspory paliva na 100 km



Graf. 5 Porovnání spotřeby a úspory paliva



Z porovnání vychází jako vhodné řešení elektrická a hydrostatická metoda rekuperace kinetické energie.

Výhodou elektrické metody jsou nízké ztráty při rekuperaci zapříčiněné vysokou účinností elektromotorů a akumulátorů. Další výhodou je možnost hybridních a plně elektrických vozidel rekuperovat energii bez nutnosti pořízení a montování dalších součástí. To je ve stejné míře nevýhodou vzhledem k nutnosti hybridního, případně plně elektrického, pohonu vozu. V současné době je velkým problémem také složitá likvidace elektrochemických akumulátorů.

Výhoda hydrostatické metody spočívá hlavně v absenci elektromotorů, ekologické nezávadnosti akumulátorů a možnosti ji namontovat na již používané vozidlo bez výrazných problémů. Nevýhodou je vysoká hmotnost celého systému, a vysoká závislost účinnosti systému na hmotnosti vozidla a frekvenci zpomalování.

Mezi méně vhodné řešení rekuperace energie v autobusové dopravě patří systémy se setrvačnickým akumulátorem.

Výhodou elektromechanické metody je vysoká, téměř neomezená, životnost akumulátoru a jeho ekologická nezávadnost. Velkou nevýhodou je zde stejně jako u elektrické nutnost elektromotorů na hnacích nápravách. Další nevýhodou je gyroskopický moment působící na vozidlo způsobený rotujícím setrvačnickem. Ten je nevýrazný při použití v autobusové dopravě, ale například v případě závodních vozidel je to velký problém.

Nejméně účinná metoda použití rekuperačních systémů v autobusové dopravě je mechanická. Úplné zastavení autobusu pouze za pomoci setrvačnicku je kvůli jeho hmotnosti (velikosti kinetické energie) téměř nemožné. Pro porovnání – velikost setrvačnicku použitého ve vozidle Volvo XC90 a setrvačnicku v systému Flybus je téměř totožná. Problém by se teoreticky dalo vyřešit zvýšením velikosti setrvačnicku, ale to přináší více problémů (úložný prostor, bezpečnost, cena...) než řešení.

### 8.3 AUTOBUSY DOPRAVNÍHO PODNIKU MĚSTA BRNO

V Brně bylo v provozu na konci roku 2021 celkem 334 autobusů hromadné městské dopravy. Z toho 54 vozů je autobus SOR NBG 12 pohonem na stlačený zemní plyn (CNG). Dohromady autobusy SOR NBG 12 najezdí ročně 2 917 778 km. [61] Žádný z těchto vozů není vybaven rekuperačním systémem.

Vzhledem k absenci elektromotorů na hnacích nápravách a absenci baterií se jeví jako ideální možnost zde aplikovat hydrostatický rekuperační systém. Tomu napovídá také poměrně vysoká hmotnost vozidel a časté zastávky způsobené jízdou ve městě.

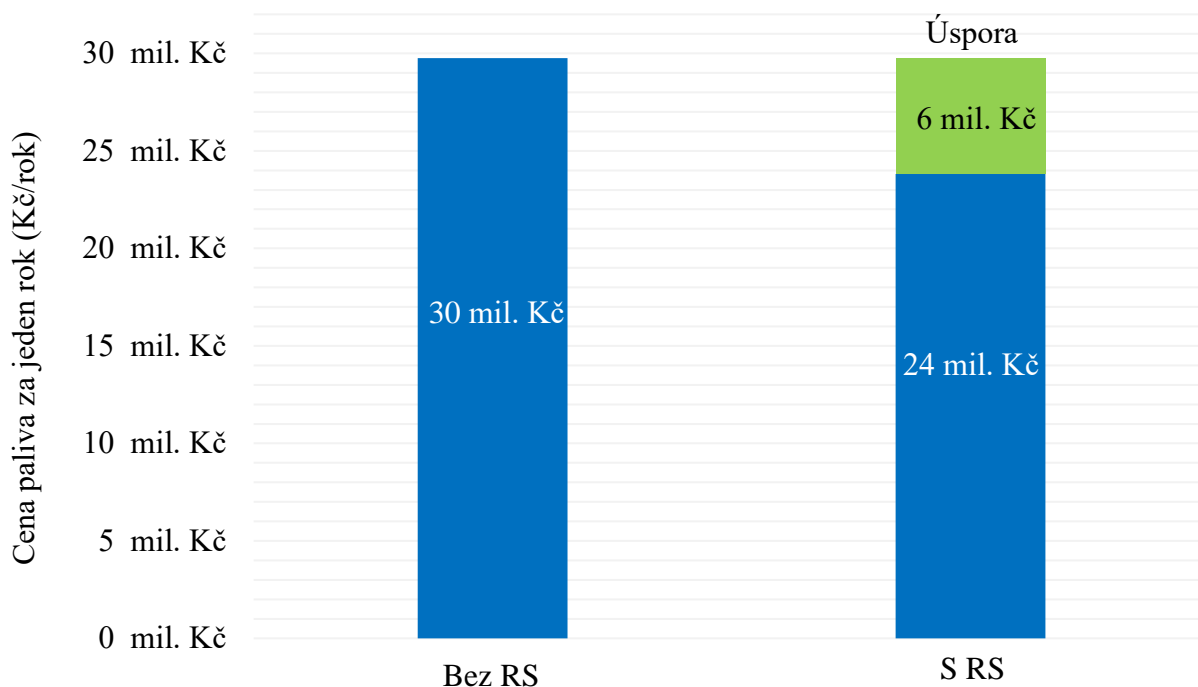
Tabulka 7 Počet a specifikace vozidel DPMB [58], [59], [61]

|            | Počet vozidel<br>Dopravního podniku<br>města Brno | Spotřeba vozidla<br>(m <sup>3</sup> /100 km) | Průměrné ujeté<br>kilometry jednoho<br>vozidla v roce<br>2021 (km/rok) | Produkovávané emise<br>CO <sub>2</sub> (g/km) |
|------------|---|--|--|---|
| SOR NBG 12 | 54  | 34   | 54 033   | 1 475   |

Rekupační systém Bosch Rexroth uvádí účinnost ve městě až 25 % při ideálních podmínkách. [49] Testování systému probíhalo na vozech svozu komunálního odpadu, které zastavují ještě častěji než autobusy a váží více. Proto pro konzervativnější výsledky bude předpokládána účinnost systému v autobusech 20 %.

Tabulka 8 Spotřeba a celková úspora vozidla SOR NBG 12

| Pro všechna vozidla SOR NBG 12 (54 kusů)        | Bez rekupačního systému (bez RS) | S rekupačním systémem Bosch Rexroth (S RS) | Celková úspora |
|---|----------------------------------|--|----------------|
| Spotřeba (m <sup>3</sup> /rok)                  | 992 045                          | 793 636                                    | 198 409        |
| Cena paliva (Kč/rok)                            | 29 761 350                       | 23 809 080                                 | 5 952 270      |
| Roční produkované emise CO <sub>2</sub> (t/rok) | 4 303,7                          | 3 442,96                                   | 860,74         |



Graf. 6 Porovnání ceny ročního provozu autobusů s rekupačním systémem (RS) a bez rekupačního systému

Cenu rekupačního systému společnost Bosch nikdy nezveřejnila. Jediný uváděný údaj je návratnost nákladů na pořízení systému. Za předpokladu, že autobus za rok najezdí přibližně dvakrát více, nezastavuje tak často jako vozidlo pro svoz komunálního odpadu a váží přibližně stejně, lze předpokládat, že návratnost nákladů se ze 4 let zkrátí pouze na 2 roky. Městské autobusy se obvykle nakupují s garantovanou životností 10 let. [62] To znamená, že rekupační systém Bosch Rexroth by za celou garantovanou životnost jednoho autobusu ušetřil až 900 000 Kč během 8 let. Stejně tak autobus by v provozu po celou dobu využívání vyprodukoval až o 160 tun emisí CO<sub>2</sub> méně. Celkově pro celý vozový park autobusů SOR NBG 12 dopravního podniku města Brno by byl rekupační systém schopen ušetřit až 48 600 000 Kč za celou dobu garantované životnosti.

## 9 VÝHLED DO BUDOUCNA

### 9.1 REKUPERACE ENERGIE Z TLUMIČŮ VOZIDLA

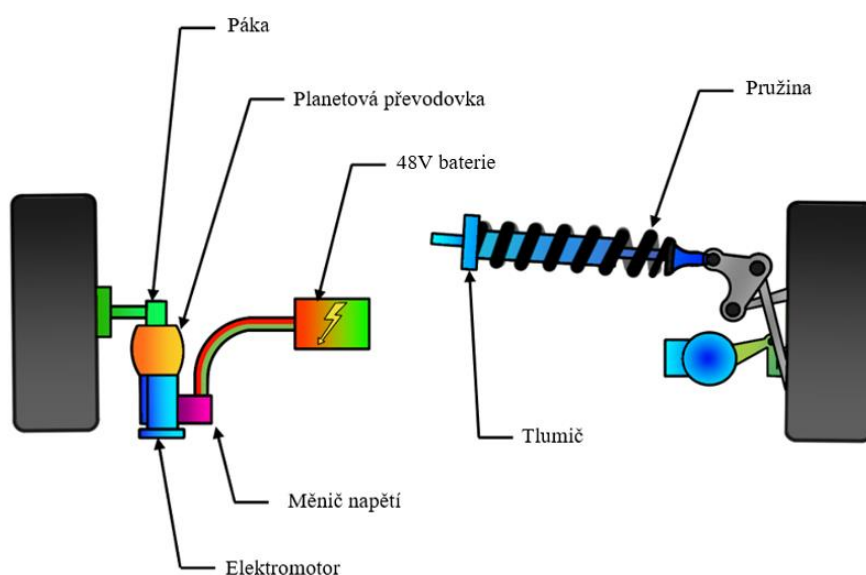
Jízda v zatáčkách a nerovnosti vozovky jsou zdrojem kinetické energie, která je v tlumičích přeměňována na ztrátovou tepelnou energii. Nahrazení konvenčních tlumičů elektromechanickými umožňuje tuto energii využít například pro napájení palubního počítače, nebo pro nabití akumulátoru.

#### 9.1.1 PROTOTYP AUDI EROT

V roce 2017 společnost Audi otestovala prototyp elektromechanických rotačních tlumičů (Obr. 9.1) připojených k 48V síti. V závislosti na stavu vozovky se rekuperovaný výkon pohyboval v rozmezí 3 W na nově asfaltované vozovce, až 613 W na vozovce nižší třídy s častými výmoly. V průměrném provozu byl průměrný rekuperovaný výkon 125 W. Celkově to odpovídá snížení produkovaných emisí CO<sub>2</sub> až o 3 g/km. [63]

Rotační tlumiče jsou uloženy v horizontální poloze a s kolem spojené pomocí ramena. Při pohybu kola nahoru a dolů rameno převádí pohyb na převodovku. Elektromotory umístěné na převodovce poté v režimu generátoru generují elektrickou energii. Ta je skladována v 48V Li-ion baterii s kapacitou 0,5 kWh.

Kromě rekuperace energie tlumiče umožňují vyšší komfort při jízdě. Každé kolo lze nezávisle na ostatních zdvihnout nahoru, nebo stlačit dolů, a tím přizpůsobovat polohu kola stavu vozovky. Řídící jednotka dostává od senzoru informaci o stavu vozovky každých 5 ms. Podvozek tím dokáže regulovat otřesy karoserie. Stejně tak při jízdě zatáčkou vyšší rychlostí (80 až 130 km/h) se karoserie automaticky nakloní až o 3°, a tím sníží velikost zrychlení působící na řidiče vozidla. Pro provoz senzorů a elektromotorů je využívána rekuperovaná energie z Li-ion baterie. [63]



Obr. 9.1 Schéma elektromechanických tlumičů, pohled shora (vlevo) a pohled zepředu (vpravo)

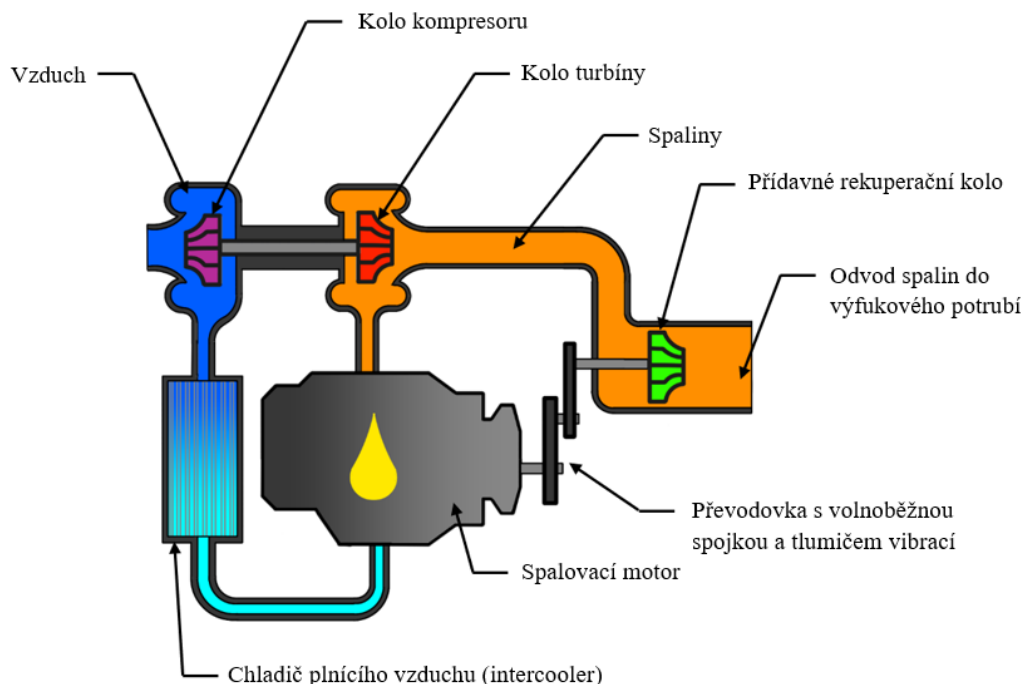
## 9.2 REKUPERACE KINETICKÉ ENERGIE SPALIN

Přeplňováním motoru pomocí turbodmychadla (Obr. 9.2) lze zvýšit jeho výkon a účinnost bez zvyšování objemu motoru. Kolo kompresoru je mechanicky spojeno s kolem turbíny, a slouží k nasávání vzduchu do motoru. Vzduch je s mírným přetlakem dodáván do spalovacího prostoru motoru. Díky většímu množství dodaného vzduchu lze spálit větší množství palivové směsi a tím zvýšit výkon motoru. Kolo turbíny je poháněno kinetickou energií spalin vycházejících z motoru. Spaliny poté co předají část své kinetické energie kole turbíny pokračují do výfukového potrubí vozidla. V případě konvenčního turbodmychadla zůstává zbytek energie nevyužitý. [64]

Jedním z možných způsobů využití této ztrátové energie je tzv. Turbo Compounding. Přidáním další turbíny do výfukového potrubí lze docílit využití ještě vyšší části kinetické energie spalin. Turbína mění kinetickou energii na elektrickou za pomoci elektromotoru, nebo je pomocí převodovky a spojky spojena s klikovou hřídelí motoru a pomáhá s jejím roztáčením. [64]

Rekuperace energie z výfukových plynů je od roku 2014 používána v závodech Formule 1. Systém s označením MGU-H generuje elektrickou energii, kterou ukládá do akumulátoru pro pozdější využití. Energie je zpětně využívána k zvýšení otáček turbodmychadla. Od roku 2026 bude použití v závodech zakázáno. Technologie je příliš složitá a její vývoj by byl příliš drahý pro případné nové týmy. [65]

Využití v osobních vozidlech se zdá jako nevýhodné, vysoká cena a složitost systému se výrobcům automobilů nevyplatí. Nicméně využití v naftových lodích a tahačích může být výhodné. Vysoký výkon motorů a větší množství produkovaných spalin umožňuje rekuperaci energie v násobně větším měřítku než u osobních vozidel.



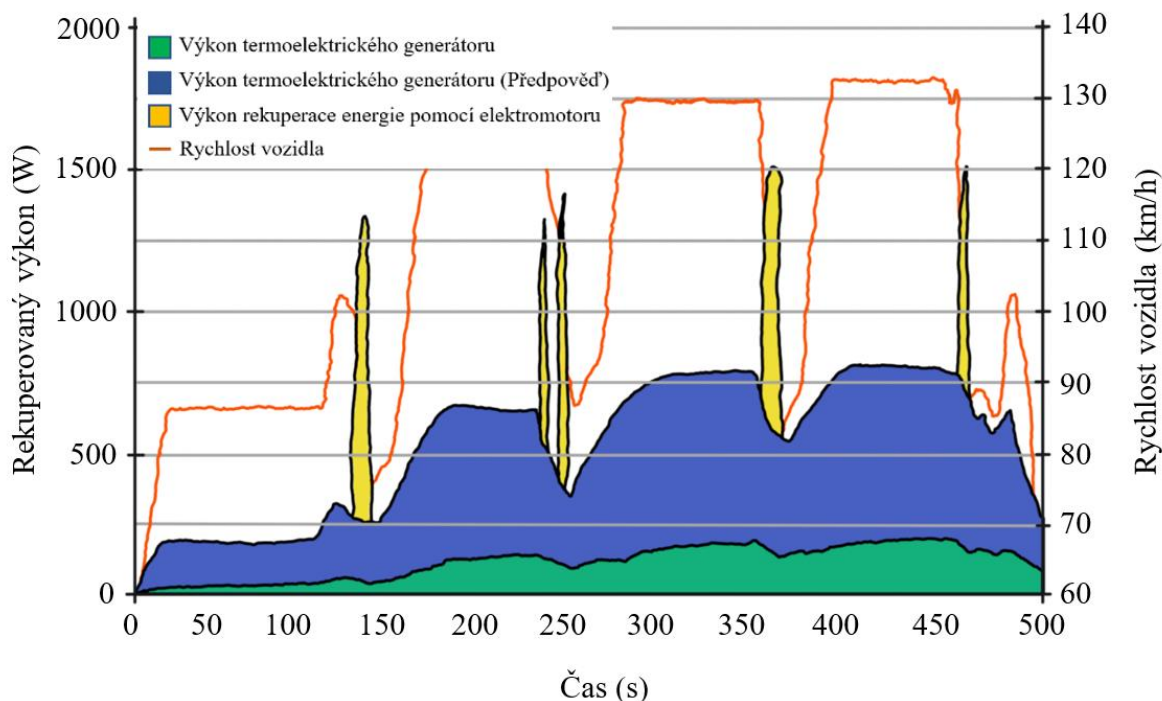
Obr. 9.2 Schéma rekuperačního systému tvořeného turbodmychadlem

### 9.3 REKUPERACE TEPELNÉ ENERGIE SPALIN

Jedním z možných řešení rekuperace tepelné energie ze spalin je využití termoelektrických generátorů. Řešení na podobném principu využívá společnost NASA již více než 50 let, s tím rozdílem, že nerecuperují energii ze spalin, ale tepelnou energii generovanou radioizotopovým termoelektrickým generátorem, kde teplo vzniká přirozeným rozpadem daného prvku, např. plutonia. Společnost BMW v roce 2009 začala pracovat na zabudování podobného systému do výfukového potrubí automobilu.

Termoelektrické polovodiče využívají Seebeckova jevu. Ten říká, že teplotní rozdíl na dvou termoelektrických polovodičích generuje elektrické napětí. Použitím tepla výfukových plynů je tedy možné generovat elektrickou energii a použít ji například k napájení palubní sítě, případně ji ukládat do baterie.

Maximální výkon těchto generátorů se v dnešní době pohybuje okolo 600 W, tzn. maximální potencionální snížení spotřeby se pohybuje okolo 1,5 %. Cílem vývojářů z BMW je snížení spotřeby až o 5 % a zvýšení výkonu generátoru až na 1 kW. V dnešní době se snížení spotřeby pohybuje v rozmezí 0,5 až 1,5 % [66]. Tento způsob rekuperace energie se stejně jako u rekuperace kinetické energie spalin téměř jistě nevyplatí u osobních vozidel. Jedním z důvodů je také čím dál vyšší počet hybridních a plně elektrických vozidel. Nicméně u nákladních vozidel a tahačů se s nahrazením spalovacích motorů ještě nepočítá, a proto se využití termoelektrických generátorů jeví jako vhodné. [67]



Graf. 7 Rekuperovaný výkon termoelektrického generátoru BMW [66]

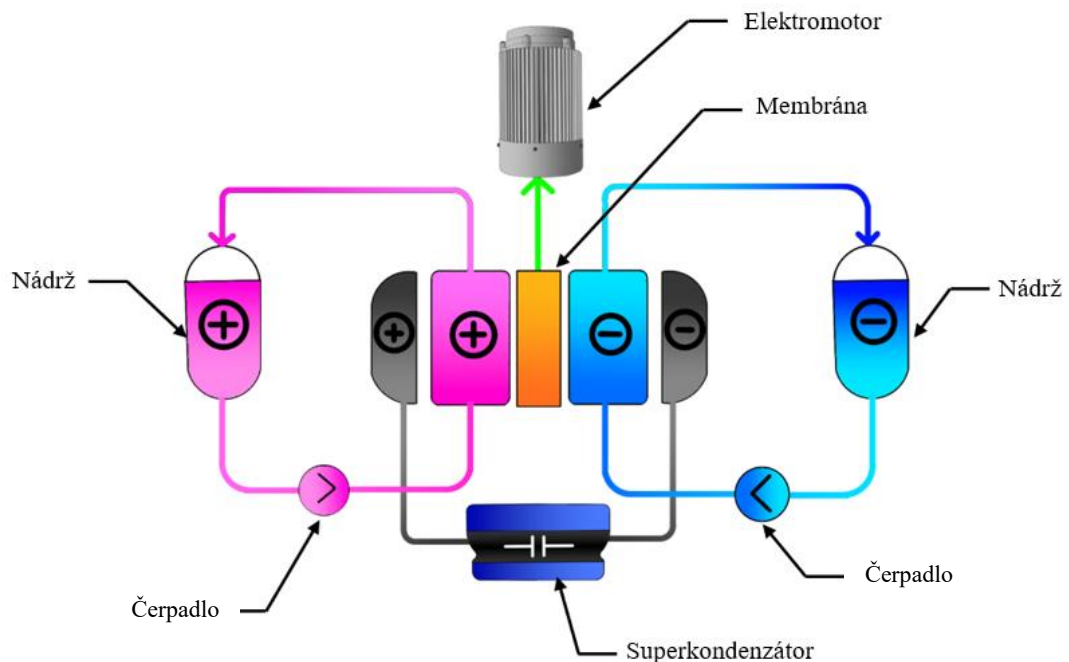
## 9.4 VÝVOJ NOVÝCH AKUMULÁTORŮ

Dnešní baterie, a proto i rekuperační systémy, jsou omezeny výkonností a dlouhodobou spolehlivostí baterií. Jejich zlepšení, či zcela nové technologie, by mohly ve velké míře ovlivnit účinnost rekuperačních systémů a tím i elektromobilů obecně.

Jednou ze společností zabývajících se novými technologiemi v oblasti akumulátorů je švýcarská společnost nanoFlowcell. Společnost vyvíjí průtokové palivové články, které lze místo nabíjení z rozvodné sítě jednoduše doplnit na čerpací stanici.

Palivové články (Obr. 9.3) využívají takzvaný bi-ION elektrolyt. Ten je tvořen organickými a anorganickými soli ve vodném roztoku. Elektrolyt je uložen ve dvou nádržích, jedna obsahuje kladně nabitý a druhá záporně nabitý elektrolyt. Při přeměně energie postupně dochází k výměně vypotřebovaného elektrolytu novým uloženým právě v těchto nádržích. Elektrolyt proudí skrze palivový článek, ve kterém se nachází membrána, na níž dochází k řízené přeměně energie. Chemická energie se mění na elektrickou oxidační a redukční reakcí, které probíhají současně.

V roce 2014 společnost oznámila testování baterií na vozidle nanoFlowcell QUANT. O dva roky později začalo testování také na vozidle nanoFlowcell QUANTiNO. V případě QUANTiNa byl při testech stanoven dojezd vozidla 1000 km při dvou nádržích, každé o objemu 72 litrů, které mají celkovou kapacitu 85 kWh. [68]



Obr. 9.3 Schéma palivového článku nanoFlowcell

Mezi výhody těchto akumulátorů patří vysoká bezpečnost, nízké produkované emise a nízká výrobní cena. Výrobní cenu je vzhledem k neznámému přesnému složení elektrolytu potřeba brát s rezervou. Naopak mezi nevýhody patří neexistující infrastruktura dodávání, výroby a skladování elektrolytu. [69]

## 10 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit přehled používaných rekuperačních systémů v automobilové technice, porovnat jednotlivé systémy a vytvořit přehled možných nových rekuperačních systémů.

Rekuperace kinetické energie může být realizována čtyřmi způsoby. Každý z nich má své výhody v daných odvětvích automobilismu, ale také své nevýhody. Všechny metody rekuperace však mají jedno společné – dokáží snížit spotřebu paliva a produkci toxických emisí o nemalé množství.

V oblasti nákladní techniky a autobusové dopravy se jako ideální řešení jeví hydrostatická metoda rekuperace kinetické energie. Vlastní hmotnost systému (až 500 kg) zde není výrazný problém. Naopak hmotnost vozidla, a tedy i velikost jeho kinetické energie při jízdě, jsou výborným předpokladem pro správnou funkčnost systému, jehož účinnost je přímo závislá na hmotnosti vozidla. Samozřejmě vše má svá omezení, pokud by se jednalo o nákladní vozidlo, které je používáno pouze pro jízdu po dálnici s nízkou frekvencí zpomalování, je třeba vzít v úvahu, zda pořízení rekuperačního systému bude ekonomicky výhodné.

V oblasti těžké techniky, kam patří například kontejnerové jeřáby a velké manipulátory, by mohla mít slibnou budoucnost elektromechanická metoda. Výzkum, jemuž se věnuje Texaská univerzita v Austinu jasně ukazuje vysoký potenciál využití setrvačnickových baterií k akumulaci energie při přemísťování těžkých nákladů. Gyroskopický moment, který by byl generován rotujícími setrvačníky a je velkým problémem u jedoucích vozidel, by bylo možné zanedbat umístěním setrvačnickové baterie mimo daný stroj.

Automobilky v oblasti motorsportu se s vývojem nových akumulátorů, v tomto případě hlavně superkondenzátorů, s vysokým měrným výkonem umožňujících velmi rychlé uložení a následné využití energie stále častěji uchylují k elektrické metodě rekuperace kinetické energie. Jedná se například o závody Formule 1 a 24h Le Mans. Z pohledu motorsportu je rekuperační systém zajímavý z několika důvodů. Mezi ně patří hlavně snížení spotřeby vozidla a snížení zatížení brzd. Z pohledu diváka je velkou výhodou zvýšení atraktivity závodu způsobené možností krátkodobě zvýšit výkon vozidla, a tudíž zvýšit potenciál vozidla předjíždět v místech kde by předjetí bez rekuperačního systému bylo dříve téměř nemožné. Bohužel stejně jako u jiných aplikací i zde jsou dané nevýhody – mimo jiné vysoká hmotnost baterií a jejich omezená bezpečnost při nehodách. Ale jak se zdá, výhody převažují nevýhody, a proto je stále větší množství automobilek co systémy v závodech využívají.

S nástupem hybridních a plně elektrických vozidel se v oblasti osobní dopravy stále častěji objevují elektrické metody rekuperace kinetické energie. Důvod je jasný, vozidlo je vybavené elektromotorem a baterií pro pohon, tudíž má i „zabudovaný“ rekuperační systém. Pouze několik automobilek stále experimentuje s mechanickou metodou rekuperace, mezi nimiž například Volvo ve svém vozidle Volvo XC90. V osobní dopravě mají rekuperační systémy největší smysl. Vzhledem k počtu osobních vozidel ve světě jde o největší skupinu z výše zmíněných. Proto i jejich účinek – snížení spotřeby a snížení emisí – je zde největší.

Při výpočtu ekonomické výhodnosti použití rekuperačního systému v autobusové dopravě vyšlo, že jeden autobus je schopný po dobu své životnosti ušetřit až 900 000 Kč. Výpočet je třeba brát s rezervou. Při výpočtu bylo vycházeno z několika polehčujících předpokladů.



---

Průměrný roční nájezd, průměrná spotřeba paliva, průměrná účinnost rekuperačního systému a průměrná návratnost pořízení systému Bosch Rexroth jsou vše zjednodušující předpoklady, které výrazně ovlivňují výpočet. Pro přesnější výsledek by bylo třeba vzít v úvahu jednotlivé okolní vlivy. Mezi něž patří například profil trasy, po které autobus jezdí. Každé stoupání nebo naopak klesání trasy ve velké míře ovlivňuje účinnost rekuperačního systému. Stejně tak by bylo třeba vzít v úvahu frekvenci zastávek, nebo například styl jízdy řidiče, i když to výpočet ovlivní jen v malé míře. Celkově pro přesný výsledek by bylo třeba provést experimentální měření. Přesto výpočet v této bakalářské práci ukazuje vysoký potenciál využití rekuperačních systémů.

Celkově budoucnost nahrává rozšíření rekuperačních systémů do téměř každého nově vyráběného automobilu. S vývojem nových akumulátorů bude možné ještě více minimalizovat ztrátovou tepelnou energii při brzdění. Navíc pokud se vyplní předpoklady několika společností, tak bude možné rekuperovat energii nejen při zpomalování, ale také například energii spalin při zrychlování vozidla a energii pohlcovanou tlumiči při jízdě.

## 11 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] WENZEL, Michael. SBB Ce 6/8 II. In: *Rail Pictures* [online]. 2002 [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: <https://www.railpictures.net/viewphoto.php?id=575592&nseq=58>
- [2] ŚLIWIŃSKI, C. Kinetic energy recovery systems in motor vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, **148**, 12. ISSN 1757-8981. Dostupné z: [doi:10.1088/1757-899X/148/1/012056](https://doi.org/10.1088/1757-899X/148/1/012056)
- [3] AMC Amitron concept car from 1967. In: *Motor car* [online]. [cit. 2021-11-06]. Dostupné z: <https://motor-car.net/amc/item/14101-amc-amitron-concept>
- [4] GRAHAME, James. 1968: AMC's Amazing Amitron Electric Car. In: *Retro Thing* [online]. 2005 [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: <https://www.retrothing.com/2008/09/1968-amcs-amazi.html>
- [5] DRAGOUN, Aleš. Toyota Prius XW10 (1997-2003). In: *Auto* [online]. CZECH NEWS CENTER a.s., 2001 [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/toyota-prius-xw10-1997-2003-prvni-hromadne-vyrabeny-hybrid-sveta-ma-20-let-109005>
- [6] SOLBERG, Greg. The Magic of Tesla Roadster Regenerative Braking. In: *Tesla* [online]. 3500 Deer Creek Road Palo Alto, CA 94304, 2007 [cit. 2021-11-06]. Dostupné z: [https://www.tesla.com/cs\\_CZ/blog/magic-tesla-roadster-regenerative-braking](https://www.tesla.com/cs_CZ/blog/magic-tesla-roadster-regenerative-braking)
- [7] Tesla Roadster (2008). In: *Net Car Show* [online]. 2005 [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: <https://www.netcarshow.com/tesla/2008-roadster/>
- [8] SPINELLI, Mike. Kinetic Energy for Formula One. In: *Popular science* [online]. Amazon Services LLC [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.popsci.com/cars/article/2008-07/kinetic-energy-formula-one/>
- [9] CO JE TO REKUPERACE?. In: *Altea s.r.o.* [online]. 2008 [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: <https://www.atrea.cz/cz/co-je-to-rekuperace>
- [10] POPE, Byron. Ford Regenerative Brakes Rack Up Big Energy Savings. In: *WardsAuto* [online]. [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: <https://www.wardsauto.com/technology/ford-regenerative-brakes-rack-big-energy-savings>
- [11] VODOVOZOV, V., A. RASSÖLKIN, N. LILLO a Z. RAUD. Energy saving estimates for regenerative braking and downhill driving of battery electric vehicles. In: *2014 14th Biennial Baltic Electronic Conference (BEC)*. 2014, s. 237-240. ISSN 2382-820X. Dostupné z: [doi:10.1109/BEC.2014.7320600](https://doi.org/10.1109/BEC.2014.7320600)
- [12] BOSCH, Robert. Rekuperační systém s podporou akcelerace: Bosch činí hybridní pohon cenově dostupným. In: *Technický portál* [online]. Nádražní 32, 150 00 Praha: Business Media CZ s.r.o. [cit. 2022-01-30]. Dostupné z:

- [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/zpravodajstvi-tt/rekuperacni-system-s-podporou-akcelarace-bosch-cini-hybridni-pohon-cenove-dostupnym\\_21895.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/zpravodajstvi-tt/rekuperacni-system-s-podporou-akcelarace-bosch-cini-hybridni-pohon-cenove-dostupnym_21895.html)
- [13] Mercedes inflates price for 2011 KERS supply. In: *Motor1* [online]. [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://www.motor1.com/news/23646/mercedes-inflates-price-for-2011-kers-supply-report/>
- [14] PAVLŮSEK, Ondřej. Volvo dokončilo testování KERS, výrazně sníží spotřebu paliva. In: *Auto* [online]. CZECH NEWS CENTER a.s., 2001 [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/volvo-dokoncilo-testovani-kers-vyrazne-snizi-spotrebu-paliva-74248>
- [15] Volvo Adding KERS to Production Cars in 2020. In: *The Brake Report* [online]. 2012 [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: <https://thebrakereport.com/volvo-using-kers-on-production-cars-in-2020/>
- [16] Volvo Cars tests of flywheel technology confirm fuel savings of up to 25 per cent. In: *Volvo Cars* [online]. SE-405 31 Gothenburg: Volvo Car Group [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/48800>
- [17] Volvo XC90. In: *Volvo* [online]. [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: <https://www.volvocars.com/cz/v/cars/xc90>
- [18] COXWORTH, Ben. Flybus to start testing flywheel hybrid bus. In: *New Atlas* [online]. Gizmag Pty Ltd., 2002 [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: <https://newatlas.com/flybus-flywheel-hybrid-bus/19766/>
- [19] DEAKIN, Andrew. Kinetic Energy Recovery System in a Bus Application. *ATZ worldwide*. 2016, **118**(9), 26-31. ISSN 2192-9076. Dostupné z: doi:10.1007/s38311-016-0089-2
- [20] HEDLUND, Magnus, Johan LUNDIN, Juan DE SANTIAGO, Johan ABRAHAMSSON a Hans BERNHOFF. Flywheel Energy Storage for Automotive Applications. *Energies*. 2015, **8**, 10636-10663. Dostupné z: doi:10.3390/en81010636
- [21] COLLINS, Sam. Flywheel hybrid systems (KERS). In: *Racecar engineering* [online]. [cit. 2021-11-06]. Dostupné z: <https://www.racecar-engineering.com/articles/f1/flywheel-hybrid-systems-kers/>
- [22] GALLIOT, Jose Izquierdo. Hamilton McLaren MP4-24. In: *Flickr* [online]. Mountain View, CA 94041, USA: SmugMug Limited [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/25867533@N07/3537075430/>
- [23] Audi R18 e-tron quattro. In: *Audi Mediacyber* [online]. 73760 Ostfildern-Scharnhausen, Germany: AUDI AG [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: <https://www.audi-mediacyber.com/en/press-releases/the-audi-r18-e-tron-quattro-803>

- [24] REINER, G a W WECK. *Operation Experience with Magnetodynamic Flywheel Storage Systems in Public Transport Buses*. 2000.
- [25] FLYNN, M., P. MCMULLEN a O. SOLIS. High-Speed Flywheel and Motor Drive Operation for Energy Recovery in a Mobile Gantry Crane. In: *APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 2007, s. 1151-1157. ISSN 1048-2334. Dostupné z: doi:10.1109/APEX.2007.357660
- [26] TER-GAZARIAN, Andrei. *Energy storage for power systems*. Harts United Kingdom: P. Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1994. ISBN 08-634-1264-5.
- [27] Niklové kadmiové baterie. In: *Technolux PRO* [online]. 2019 [cit. 2022-02-05]. Dostupné z: <https://technoluxpro.com/cs/akkumulatory/batarei/ni-cd.html>
- [28] ŠRUBAŘOVÁ, Petra. Pokročilé technologie olovených akumulátorů – gel a AGM. In: *TZB Info* [online]. Topinfo s.r.o., 2001 [cit. 2022-02-05]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/16815-pokrocile-technologie-olovenych-akumulatoru-gel-a-agm>
- [29] VOELCKER, John. Nickel-metal-hydride batteries are for electric cars. In: *Green car reports* [online]. MH Sub I, LLC [cit. 2022-02-05]. Dostupné z: [https://www.greencarreports.com/news/1097016\\_nickel-metal-hydride-batteries-for-electric-cars-energy-density-can-rise-10-fold-researchers](https://www.greencarreports.com/news/1097016_nickel-metal-hydride-batteries-for-electric-cars-energy-density-can-rise-10-fold-researchers)
- [30] Rechargeable batteries guide. In: *Micro battery* [online]. [cit. 2022-02-05]. Dostupné z: <https://www.microbattery.com/rechargeable-batteries-guide>
- [31] LAMBERT, Fred. Panasonic is investing \$700 million to produce Tesla 4680 battery cell by 2023. In: *Electrek* [online]. 2007 [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: <https://electrek.co/2022/01/24/panasonic-investing-produce-tesla-4680-battery-cell-2023/>
- [32] Electric vehicle lithium-ion battery. In: *Nissan global* [online]. [cit. 2022-02-05]. Dostupné z: [https://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/li\\_ion\\_ev.html](https://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/li_ion_ev.html)
- [33] ŠPINA, Martin. Li-ion baterie: Porovnání nejpoužívanějších typů. In: *O energetice* [online]. Kpt. Nálepky 620/7, Nové Dvory, 674 01: OM Solutions s.r.o. [cit. 2022-02-05]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/li-ion-baterie-porovnaní-nejpouzivanejsich-typu>
- [34] *A brief history of supercapacitors*. 2007. Dostupné také z: <https://web.archive.org/web/20140106032318/http://www.cantecsystems.com/ccrdocs/brief-history-of-supercapacitors.pdf>
- [35] ZHU, Qizhen, Li MA, Haoran WANG, Mengqiu JIA, Yibiao GUAN a Bin XU. Activated Carbon / Graphene Hybrid Aerogels as Electrode Materials for High

- Performance Supercapacitors. *ChemistrySelect*. John Wiley & Sons, Ltd, 2017, **2**(16), 4456-4461. ISSN 2365-6549. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/slct.201700984>
- [36] FRACKOWIAK, Elzbieta a François BÉGUIN. Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors. *Carbon*. 2001, **39**(6), 937-950. ISSN 0008-6223. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(00\)00183-4](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(00)00183-4)
- [37] WOHLFAHRT-MEHRENS, M, J SCHENK, P.M WILDE, E ABDELMULA, P AXMANN a J GARCHE. New materials for supercapacitors. *Journal of Power Sources*. 2002, **105**(2), 182-188. ISSN 0378-7753. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00937-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00937-5)
- [38] EMobility - FAQ Batteries. In: *Škoda auto* [online]. [cit. 2022-02-06]. Dostupné z: <https://www.skoda-auto.com/emobility/emobility-faq-batteries>
- [39] ŽÁK, Dalibor. Škoda Enyaq jako ojetina: Kolik bude stát provoz a servis?. In: *Garáž* [online]. Seznam [cit. 2022-02-06]. Dostupné z: <https://www.garaz.cz/clanek/skoda-enyaq-jako-ojetina-kolik-bude-stat-provoz-a-servis-21006771>
- [40] Škoda ENYAQ iV. In: *Škoda auto* [online]. [cit. 2022-02-05]. Dostupné z: <https://www.skoda-auto.cz/modely/enyaq/enyaq-iv>
- [41] NOVÝ PEUGEOT E-EXPERT. In: *Peugeot* [online]. [cit. 2022-02-05]. Dostupné z: <https://www.peugeot.cz/modelova-rada/vyber-vozu/expert-furgon/e-expert-furgon.html>
- [42] MACKENZIE, Angus. 2021 Lamborghini Sián review. In: *Which car* [online]. Media Pty [cit. 2022-02-05]. Dostupné z: <https://www.whichcar.com.au/reviews/2021-lamborghini-sian-review>
- [43] Recover and harness braking energy. In: *Bosch Rexroth* [online]. [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: <https://www.boschrexroth.com/en/xc/trends-and-topics/energy-efficiency/mobile-applications/hydraulischer-hybrid/hydraulischer-hybrid>
- [44] BODAS Controller. In: *Bosch Rexroth* [online]. 2014 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/mobile-hydraulics/mobile-electronics/bodas-hardware/bodas-controllers/rc12-10-30>
- [45] Pressure relief valve, direct controlled. In: *Bosch Rexroth* [online]. 2014 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.boschrexroth.com/cs/cz/produkty/skupiny-produktu/prumyslova-hydraulika/on-off-valves/pressure-valves/pressure-relief-valves/direct-operated/dbd>
- [46] LUDV-control block. In: *Bosch Rexroth* [online]. 2014 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/mobile-hydraulics/mobile-controls/control-blocks/m6>
- [47] SCOTT, David a Jack YAMAGUCHI. Regenerative braking for buses gives big fuel saving. *International Viewpoints*. **1984**.

- [48] Volvo B10R. In: *Gakei* [online]. [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: <http://www.gakei.com/akl/aklb/atf217.jpg>
- [49] Hydraulic hybrid garbage truck trashes energy waste. In: *Power Motion* [online]. [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: <https://www.powermotiontech.com/technologies/accumulators/article/21884076/hydraulic-hybrid-garbage-truck-trashes-energy-waste>
- [50] PURVIS, Ben. Honda's New 2WD and Regen Braking Designs for Bikes. In: *Cycle world* [online]. [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: <https://www.cycleworld.com/story/bikes/hondas-new-2wd-and-regen-braking-designs-for-bikes/>
- [51] ASH, Kevin. 2009 Honda DN-01 | First Ride Review. In: *Ride Magazine* [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://ridermagazine.com/2008/10/10/2009-honda-dn-01-road-test-ash/>
- [52] CHEN, Haisheng, Thang CONG, Wei YANG, Chunqing TAN, Yongliang LI a Yulong DING. Progress in electrical energy storage system: A critical review: A critical review. *Progress in Natural Science*. 2009, **19**(3), 291-312. ISSN 1002-0071. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>
- [53] RIES, G. a H.-W. NEUMUELLER. Comparison of energy storage in flywheels and SMES. *Physica C: Superconductivity*. 2001, **357-360**, 1306-1310. ISSN 0921-4534. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(01\)00484-1](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(01)00484-1)
- [54] BAKER, John. New technology and possible advances in energy storage. *Energy Policy*. 2008, **36**(12), 4368-4373. ISSN 0301-4215. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.040>
- [55] LEON-QUIROGA, Jorge, Brittany NEWELL, Mahesh KRISHNAMURTHY, Andres GONZALEZ-MANCERA a Jose GARCIA-BRAVO. *Energy Efficiency Comparison of Hydraulic Accumulators and Ultracapacitors*. 2020, . ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en13071632
- [56] WINTER, Martin a Ralph BRODD. What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors?. *Chemical Reviews*. American Chemical Society, 2004, **104**(10), 4245-4270. ISSN 0009-2665. Dostupné z: doi:10.1021/cr020730k
- [57] LUO, Xing, Jihong WANG, Mark DOONER a Jonathan CLARKE. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*. 2015, **137**, 511-536. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>
- [58] PELKMANS, Luc. *Emissions and fuel consumption of natural gas powered city buses versus diesel buses in realcity traffic* [online]. Vito, Belgie, 2001 [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/267971187\\_Emissions\\_and\\_fuel\\_consumptio](https://www.researchgate.net/publication/267971187_Emissions_and_fuel_consumptio)

- n\_of\_natural\_gas\_powered\_city\_buses\_versus\_diesel\_buses\_in\_real-city\_traffic.  
Článek. Flemish Institute for Technological Research.
- [59] VESELÁ SCHAUHUBEROVÁ, Markéta. *Řešení pro čistá města - CNG* [online]. mezinárodní strojírenský veletrh, Brno, 2013 [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/konference\\_cista\\_mobilita/OTM-Reseni\\_pro\\_cista\\_mesta\\_CNG\\_Ing\\_Schauhuberova-21102013.pdf](https://www.mzp.cz/konference_cista_mobilita/OTM-Reseni_pro_cista_mesta_CNG_Ing_Schauhuberova-21102013.pdf). Presentace. RWE Česká republika a.s.
- [60] Volvo 7900 Electric. In: *Volvo buses* [online]. 405 08 Gothenburg, Sweden: AB Volvo 2022 [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: <https://www.volvobuses.com/en/city-and-intercity/buses/volvo-7900-electric.html>
- [61] NAVRÁTILOVÁ, Vladimíra. Ročenka dopravy Brno 2020. In: *Urban centrum Brno* [online]. Brno: White Label [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: [https://urbancentrum.brno.cz/wp-content/uploads/2021/06/2020\\_rocenka-dopravy-2020.pdf](https://urbancentrum.brno.cz/wp-content/uploads/2021/06/2020_rocenka-dopravy-2020.pdf)
- [62] MACKECHNIE, Christopher. How Long Do Buses and Other Transit Vehicles Last?. In: *LiveAbout* [online]. [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.liveabout.com/buses-and-other-transit-lifetime-2798844>
- [63] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERING, NITK. Audi-eROT technology. In: *Linkedin* [online]. 2003 [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: [https://www.linkedin.com/pulse/audi-erot-technology-saenitk?trk=organization-update-content\\_share-article](https://www.linkedin.com/pulse/audi-erot-technology-saenitk?trk=organization-update-content_share-article)
- [64] HIERETH, Hermann a Peter PRENNINGER. *Charging the Internal Combustion Engine*. 1. Wien: Springer-Verlag, 2007, 268 s. ISBN 978-3-211-33033-3.
- [65] RANDUŠKA, Róbert. Blíží se konec MGU-H. In: *Formule* [online]. Automedia News, s.r.o. [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: <https://www.formule.cz/clanek/45144-blizi-se-konec-mgu-h>
- [66] LIEBL, Johannes, Stephan NEUGEBAUER, Andreas EDER, Matthias LINDE, Boris MAZAR a Wolfgang STÜTZ. The thermoelectric generator from BMW is making use of waste heat. *MTZ worldwide*. 2009, **70**(4), 4-11. ISSN 2192-9114. Dostupné z: doi:10.1007/BF03226939
- [67] BMW provides an update on waste heat recovery projects; Turbosteamer and the Thermoelectric Generator. In: *Greencar congress* [online]. BioAge Group, LLC, 2004 [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: <https://www.greencarcongress.com/2011/08/bmwthermal-20110830.html>
- [68] NanoFlowcell QUANTiNO 48VOLT. In: *NanoFlowcell* [online]. Böndlerstrasse 10: nanoFlowcell Management AG [cit. 2022-03-01]. Dostupné z:



<https://nanoflowcell.com/en/research-development/application-research/mobility/quantino-48volt/>

- [69] President of the Board of Directors of nanoFlowcell AG at the Geneva International Motor Show. In: *NanoFlowcell* [online]. Böndlerstrasse 10: nanoFlowcell Management AG [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: <https://nanoflowcell.com/en/blog/editorial-items/interview-with-nunzio-la-vecchia-chief-technical-officer-and-prof-jens-ellermann-president-of-the-board-of-directors-of-nanoflowcell-ag-at-the-geneva-international-motor-show-on-3-march-2015>

## 12 SEZNAM OBRÁZKŮ

|  |    |
|--|----|
| Obr. 2.1 Lokomotiva Ce6/8 <sup>II</sup> [1].....   | 12 |
| Obr. 2.2 Schéma gyrobusu.....  | 13 |
| Obr. 2.3 AMC Amitron [4].....  | 13 |
| Obr. 2.4 Koncept vozu Toyota Prius [5].....  | 13 |
| Obr. 2.5 Tesla Roadster 2008 [7].....  | 14 |
| Obr. 3.1 Rekuperace odpadního tepla při větrání.....   | 15 |
| Obr. 3.2 Schéma BRS společnosti Bosch.....   | 16 |
| Obr. 4.1 Schéma mechanické metody rekuperace energie.....  | 17 |
| Obr. 4.2 Řez setrvačnickovým modulem.....  | 18 |
| Obr. 4.3 Kliková hřídel spalovacího motoru se setrvačnickem.....   | 19 |
| Obr. 4.4 Princip funkce variátoru.....   | 20 |
| Obr. 4.5 Volvo XC90 [17].....  | 21 |
| Obr. 4.6 KERS společnosti Volvo [16].....  | 21 |
| Obr. 4.7 Model Flybus systému [18].....  | 22 |
| Obr. 4.8 Systém Flybrid použitý ve Formuli 1 [21].....   | 23 |
| Obr. 4.9 McLaren Mercedes formule 2009 [22].....   | 23 |
| Obr. 5.1 Schéma elektromechanické metody rekuperace.....   | 24 |
| Obr. 5.2 Průřez asynchronním elektromotorem.....   | 25 |
| Obr. 5.3 Průřez rotoru synchronního elektromotoru.....   | 26 |
| Obr. 5.4 Audi R18 e-tron Quattro [23].....   | 27 |
| Obr. 5.5 Autobus v Mnichově vybavený setrvačnickem [24].....   | 28 |
| Obr. 5.6 Setrvačnickový modul trolejbusu [24].....   | 28 |
| Obr. 5.7 Setrvačnicková baterie [25].....  | 28 |
| Obr. 5.8 Kontejnerový jeřáb použitý pro testování [25].....  | 28 |
| Obr. 6.1 Způsoby elektrické metody rekuperace kinetické energie.....                                     | 29 |
| Obr. 6.2 a) Článek se společným elektrolytem b) Článek s porézni deskou c) Článek se solným můstkem..... | 30 |
| Obr. 6.3 Nikl-kadmiový akumulátor [27].....  | 31 |
| Obr. 6.4 Olověný akumulátor automobilu [28].....   | 31 |
| Obr. 6.5 NiMH akumulátor elektromobilu [29].....   | 32 |
| Obr. 6.6 NiMH akumulátor pro malé spotřebiče [30].....   | 32 |

|  |    |
|--|----|
| Obr. 6.8 Li-ion baterie elektromobilu [32] .....                                 | 33 |
| Obr. 6.7 Li-ion baterie do malých spotřebičů [33] .....                          | 33 |
| Obr. 6.9 Průřez EDLC kondenzátorem .....   | 34 |
| Obr. 6.10 Průřez pseudokondenzátoru .....  | 35 |
| Obr. 6.11 Elektromotor Škody ENYAQ iV 195 kW [40] .....                          | 36 |
| Obr. 6.12 Škoda ENYAQ iV [40] .....  | 36 |
| Obr. 6.13 Peugeot e-Expert [41] .....  | 37 |
| Obr. 6.14 Elektromotor Peugeot e-Expert 100 kW [41] .....                        | 37 |
| Obr. 6.15 Lamborghini Sián [42] .....  | 38 |
| Obr. 7.1 Schéma paralelního zapojení hydrostatického rekuperačního systému ..... | 39 |
| Obr. 7.2 Axiální pístové čerpadlo .....  | 40 |
| Obr. 7.3 Vakový akumulátor .....   | 40 |
| Obr. 7.4 Řídicí jednotka Bosch [44] .....  | 41 |
| Obr. 7.5 Upouštěcí ventil Bosch [45] .....                                       | 41 |
| Obr. 7.6 Blok ventilů Bosch [46] .....   | 41 |
| Obr. 7.7 Volvo B10R [48] .....   | 41 |
| Obr. 7.8 Vozidlo pro svoz komunálního odpadu [43] .....                          | 42 |
| Obr. 7.9 Honda DN-01 [50] .....  | 43 |
| Obr. 7.10 Hydraulická převodovka DN-01 [51] .....                                | 43 |
| Obr. 9.1 Schéma elektromechanických tlumičů .....                                | 50 |
| Obr. 9.2 Schéma rekuperačního systému tvořeného turbodmychadlem .....            | 51 |
| Obr. 9.3 Schéma palivového článku nanoFlowcell .....                             | 53 |

## 13 SEZNAM GRAFŮ

|  |    |
|--|----|
| Graf. 1 Zobrazení závislosti měrného výkonu na měrné energii .....   | 44 |
| Graf. 2 Zobrazení průměrných hodnot samovybití akumulátorů .....   | 45 |
| Graf. 3 Zobrazení průměrných hodnot počtu cyklů do porušení akumulátorů .....                                  | 46 |
| Graf. 4 Zobrazení průměrných hodnot účinností akumulátorů .....  | 46 |
| Graf. 5 Porovnání spotřeby a úspory paliva .....   | 47 |
| Graf. 6 Porovnání ceny ročního provozu autobusů s rekuperačním systémem (RS) a bez rekuperačního systému ..... | 49 |
| Graf. 7 Rekuperovaný výkon termoelektrického generátoru BMW [66] .....   | 52 |

## 14 SEZNAM TABULEK

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 1 Typické měrné energie jednotlivých akumulátorů [52], [53], [54], [55], [56] ..... | 44 |
| Tabulka 2 Typické měrné výkony jednotlivých akumulátorů [52], [55], [56] .....              | 44 |
| Tabulka 3 Typické hodnoty míry samovybití jednotlivých akumulátorů [52], [56] .....         | 45 |
| Tabulka 4 Typický počet cyklů jednotlivých akumulátorů [52], [56], [57] .....               | 45 |
| Tabulka 5 Typické hodnoty účinností jednotlivých akumulátorů [52], [56], [57] .....         | 46 |
| Tabulka 6 Porovnání rekuperačních metod u autobusů [19], [24], [47], [58], [59], [60] ..... | 47 |
| Tabulka 7 Počet a specifikace vozidel DPMB [58], [59], [61] .....                           | 48 |
| Tabulka 8 Spotřeba a celková úspora vozidla SOR NBG 12 .....                                | 49 |

## 15 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

|      |   |  |
|------|---|--|
| BRS  | Boost-recuperation system                 | Rekuperační systém od Bosch              |
| KERS | Kinetic energy recovery system            | Rekuperační systém kinetická energie     |
| CVT  | Continuously variable transmission        | Převodovka s plynule měnitelným převodem |
| FIA  | Fédération Internationale de l'Automobile | Mezinárodní automobilová federace        |
| ACO  | Automobile Club de l'Ouest                | Západní automobilový klub                |
| VRLA | Valve Regulated Lead Acid                 | Ventilem řízené olověné akumulátory      |
| EDLC | Electric Double Layer Capacitor           | Elektrochemický dvouvrstvý kondenzátor   |
| RS   |   | Rekuperační systém                       |
| HS   |   | Hydrostatický akumulátor                 |
| SK   |   | Superkondenzátor                         |
| MM   |   | Mechanická metoda                        |
| EMM  |   | Elektromechanická metoda                 |
| EM   |   | Elektrická metoda                        |
| HM   |   | Hydrostatická metoda                     |